

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. H. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTASY

Über den Einfluß der Brandlast
auf das Brandverhalten von Holzbauteilen

Bericht erstattet von:

Dr.-Ing. C. Meyer-Ottens

und

Dipl.-Ing. I. Noack

1986

BIBLIOTHEK
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Beethovenstraße 52
D-3300 Braunschweig

<u>Inhaltsverzeichnis</u>	Seite
<u>1</u> <u>Einleitung</u>	3
<u>2</u> <u>Ziel der Untersuchungen</u>	7
<u>3</u> <u>Kleinversuche</u>	7
3.1 Übersicht über das Versuchsprogramm.	7
3.2 Durchführung der Versuche.	9
3.2.1 Abmessungen des Prüfofens, Ölbrenner	9
3.2.2 Meßebenen, Brandraumtemperatur	9
3.2.3 Druck im Prüfofen.	11
3.2.4 Ofenauskleidung.	11
3.2.4.1 Schamotte-mauerwerk, Gasbeton-Decke	11
3.2.4.2 Spanplatten, Holzbohlen und Holzbalken; Holztemperaturen	11
3.3 Öl-Verbrauch und -Steuerung, Brandgasanalysen.	12
3.4 Versuchsergebnisse	14
3.4.1 Brandraumtemperaturen.	14
3.4.2 Brandgasanalysen	16
3.4.3 Temperaturen in den Holzbauteilen.	16
3.4.4 Ermittlung der Abbrandgeschwindigkeit.	17
3.4.5 Vergleich der Abbrandgeschwindigkeiten	19
<u>4</u> <u>Großversuche</u>	22
4.1 Prüfung einer tragenden Holzstütze	22
4.1.1 Probekörper und Prüfungsdurchführung	22
4.1.2 Prüfergebnisse	25
4.2 Prüfung einer tragenden, raumabschließenden Holzwand	26
4.2.1 Probekörper und Prüfungsdurchführung	26
4.2.2 Prüfergebnisse	28
4.3 Prüfung einer tragenden, nichtraumabschließenden Holzwand.	29
4.3.1 Probekörper und Prüfungsdurchführung	29
4.3.2 Prüfergebnisse	30
<u>5</u> <u>Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse aus Klein- und Großversuchen</u>	30
<u>6</u> <u>Vergleich der Ergebnisse mit klassifizierten Bauteilen nach DIN 4102 Teil 4</u>	33
<u>7</u> <u>Vergleich der Ergebnisse mit natürlichen Bränden</u>	36
<u>8</u> <u>Vergleich der Ergebnisse mit Brandlasten nach DIN 4102 Teil 2</u>	40
<u>9</u> <u>Literaturverzeichnis</u>	43

1 Einleitung

Bauteile, wie Stützen, Wände, Balken, Decken usw. werden zur Feststellung ihrer Feuerwiderstandsdauer und -klasse nach DIN 4102 Teil 2, Ausgabe 1977, gemäß der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) - identisch der Standardkurve nach ISO 834 - einer bestimmten Temperaturzeitbeanspruchung unterzogen. Hinsichtlich der in den Bauteilen verwendeten Baustoffe werden dabei keine Unterschiede gemacht, d.h.: Bauteile aus brennbaren wie aus nichtbrennbaren Baustoffen werden temperaturmäßig gleich beansprucht, wobei die Temperatur in 10 cm Abstand vom Prüfkörper gemessen wird.

Trotz gleicher Temperaturzeitbeanspruchung kann die "Fremdbrandlast" - d.h. die Brennstoffmenge, die zur Erzeugung der Solltemperaturen zugeführt werden muß - sehr unterschiedlich sein. Bei Bauteilen aus brennbaren Baustoffen ist die Fremdbrandlast zur Erzeugung der ETK wesentlich kleiner als bei Bauteilen aus nichtbrennbaren Baustoffen. Der Differenzbetrag hängt dabei von der Wärmemenge ab, die bei brennbaren Baustoffen durch Abbrand abgegeben wird (Eigenbrandlast). Eine vorhandene Brandlast (Fremdbrandlast) aus Lagergut, Möbeln usw. wird bei Verwendung von Holzbauteilen durch die Eigenbrandlast der Holzbauteile - ggf. wesentlich - vergrößert, eine Größe, die bei der Verwendung von Bauteilen aus nichtbrennbaren Baustoffen nicht beachtet zu werden braucht. Es ergibt sich also:

$$\text{Brandlast } q_{\text{gesamt}} = \text{Fremdbrandlast} + \text{Eigenbrandlast}.$$

Geht man im Widerspruch zu den im Augenblick vorgeschriebenen Prüfbestimmungen der DIN 4102 Teil 2 (1977) vor und beansprucht ein Bauteil aus brennbaren Baustoffen mit einer bestimmten in der Praxis vorliegenden Fremdbrandlast, so kann sich bei derartigen Bauteilen eine Feuerwiderstandsdauer und -klasse ergeben, die niedriger ist als die unter Normbedingungen (ETK) festgestellte. Wählt man bei der Prüfung von Holzbauteilen eine Fremdbrandlast in der Größe, wie sie zur Erzeugung der ETK bei der Prüfung von Stahlbetonbauteilen aus Normalbeton erforderlich ist, dann erhält man infolge der Eigenbrandlast

- i.a. eine Temperaturzeitbeanspruchung $> ETK$,
- eine größere Abbrandgeschwindigkeit und daraus folgend ..
- eine kleinere Feuerwiderstandsdauer.

Diese Erfahrung ist nicht neu; sie wurde u.a. bereits 1969 beschrieben [1], im Zuge der Schaffung von Einheitlichen Technischen Baubestimmungen und Baugesetzen (Landesbauordnungen) aber nicht weiter verfolgt, obwohl in [1] gezeigt wurde, daß die tatsächliche Feuerwiderstandsdauer wesentlich kleiner sein kann als der nach der derzeitigen Norm ermittelte Wert.

Dem internationalen Trend folgend wurden auch im nationalen Bereich die historisch gewachsenen Prüfbestimmungen vereinheitlicht - hinsichtlich der Temperaturzeitbeanspruchung (ETK) bzw. hinsichtlich der Fremdbrandlast zur Erzeugung der ETK aber nicht geändert, vgl. DIN 4102 Teil 2, Ausgaben 1970 und 1977.

Betrachtet man die Abbrandgeschwindigkeit von Holz, die die Feuerwiderstandsdauer von Holzbauteilen maßgebend beeinflusst, so ergeben sich analog der vorstehenden Ausführungen folgende Zusammenhänge:

Nach nationalen und internationalen Prüferfahrungen mit üblichen Prüföfen für die Prüfung von Bauteilen beträgt die Abbrandgeschwindigkeit von Nadelholz ohne Berücksichtigung eines Verformungseinflusses bei ETK-Beanspruchung im Mittel 0,65 mm/min bis 0,70 mm/min [2]. In Extremfällen wurden auch Abbrandraten von 0,50 mm/min bis 0,80 mm/min festgestellt, wobei die Holzparameter Rohdichte, Feuchtigkeitsgehalt, Porigkeit, Porenverteilung usw. von Bedeutung waren. Bei Berücksichtigung eines Verformungseinflusses (z.B. Durchbiegung) kann die Abbrandgeschwindigkeit durch Aufreißen und Abspalten von Holzfasern auf 1,10 mm/min ansteigen [2]. Um Streuungen zu erfassen, wurden in der Bundesrepublik Deutschland in Übereinstimmung mit zahlreichen Bauteilprüfergebnissen die in Tabelle 1 zusammengestellten Abbrandgeschwindigkeiten als Rechenwerte festgelegt; sie wurden auch für die Aufstellung von DIN 4102 Teil 4 (3/1981) zugrundegelegt, [2] und [4].

Bauteil aus europ. Nadelholz bei Brandbeanspruchung nach DIN 4102 Teil 2 (Ölfeuerbeanspruchung in Öfen)		Abbrand- geschwindigkeit β [mm/min]
Stützen und Zugglieder	alle Seiten	0,7
Balken	Seiten u. Oberseite	0,8
	Unterseite	1,1
Dach- und Deckenschalungen	Unterseite	1,1
	Oberseite	0,65

Bild 1:

Rechenwerte der Abbrandgeschwindigkeit von Nadelholz bei Brandbeanspruchung nach DIN 4102 Teil 2 (9/1977) mit der ETK

Betrachtet man dagegen natürliche Brände, stellen sich im Gegensatz zu ETK-gesteuerten Ofenbränden in Abhängigkeit verschiedener Parameter andere Abbrandgeschwindigkeiten und damit andere Feuerwiderstandsdauern ein. Nach Sven Hadvig [3] liegt die Abbrandgeschwindigkeit von Nadelholz ohne Verformungseinfluß in Abhängigkeit vom weltweit verwendeten Öffnungsfaktor $A\sqrt{h}/A_t$ (vgl. Abschnitt 7)

- bei Holzbränden zwischen 0,4 mm/min und 1,15 mm/min und
- bei Kunststoffbränden zwischen 0,5 mm/min und 1,8 mm/min,

vgl. Bilder 2 und 3. Ein vereinfachter Vergleich der Bilder 1 - 3 ist in Bild 4 wiedergegeben.

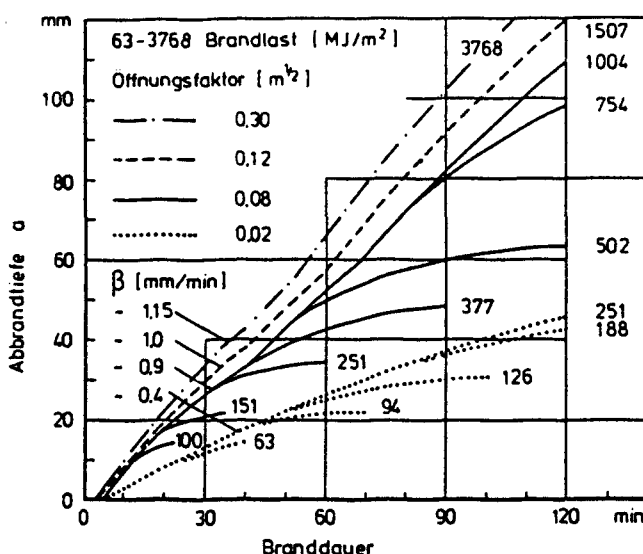


Bild 2:

Abbrandtiefe a als Funktion von Brandlast und Öffnungsfaktor in Abhängigkeit von der Branddauer bei Holzbränden nach Sven Hadvig [3]

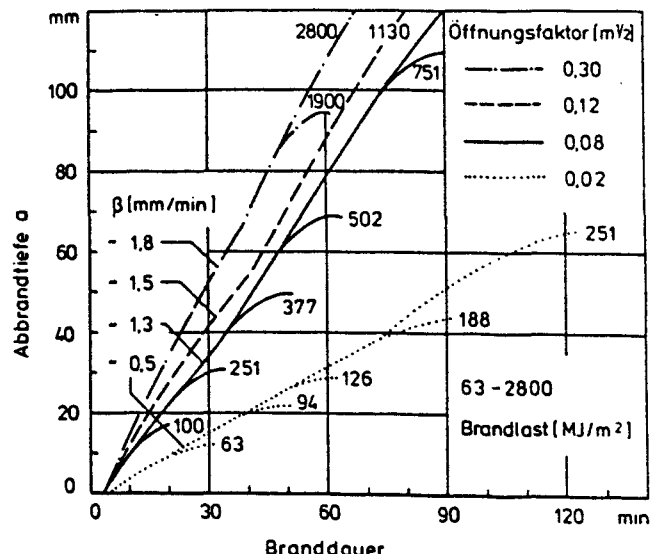


Bild 3:

Abbrandtiefe a als Funktion von Brandlast und Öffnungsfaktor in Abhängigkeit von der Branddauer bei Kunststoffbränden nach Sven Hadvig [3]

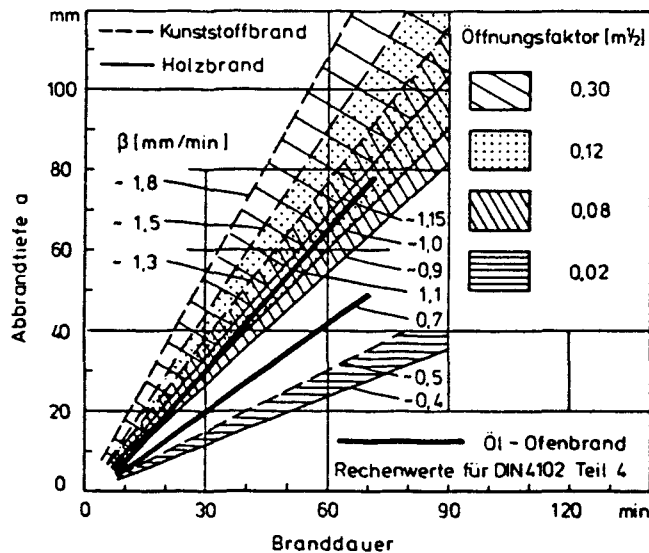


Bild 4:

Abbrandtiefe a und -geschwindigkeit β von Nadelholz bei verschiedenen natürlichen Bränden (Kunststoffbrände mit $\beta \sim 0,5$ mm/min bis 1,8 mm/min und Holzbrände mit $\beta \sim 0,4$ mm/min bis 1,15 mm/min) im Vergleich zum Normbrand (Öl-Ofenbrand) nach DIN 4102 Teil 2 und Teil 4 ($\beta = 0,7$ mm/min bis 1,1 mm/min)

Der Einfluß einer gegenüber Bild 1 vergrößerten Abbrandgeschwindigkeit auf die Feuerwiderstandsdauer von Holzstützen wurde beispielhaft in [3] behandelt. Danach konnte gezeigt werden, daß die Feuerwiderstandsdauer von Holzstützen um rd. 50 % abnimmt, wenn die Abbrandgeschwindigkeit von 0,7 mm/min (vgl. Bild 1) um rd. 40 % auf nur 1,0 mm/min (vgl. Bilder 2 und 3) angehoben wird.

Wie aus den bereits erwähnten Prüferfahrungen aus dem Jahre 1969 [1] bekannt ist, wird die Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen in einem üblichen Prüfofen für die Prüfung von Bauteilen allein durch die Brennstoffzufuhr (Fremdbrandlast) verändert. Bei Verwendung einer Fremdbrandlast, die zur Erzeugung der ETK bei der Prüfung einer Stahlbetonwand erforderlich ist, steigt die Abbrandgeschwindigkeit um ≥ 50 %, die Feuerwiderstandsdauer sinkt dabei um mehr als die Hälfte!

Die vorstehend geschilderten Fakten erschienen bei inzwischen veränderter Gesetzgebung (Novellierung der Landesbauordnungen nach der Herausgabe der Musterbauordnung MBO - Dezember 1981) - vgl. [4] - so wichtig, daß weitere Untersuchungen unbedingt notwendig waren - nicht zuletzt, um Risikosituationen weiter zu verdeutlichen oder einzugrenzen.

Über die inzwischen durchgeführten Brandversuche wird im folgenden berichtet.

2 Ziel der Untersuchungen

Da die Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen vielfach in einem Kleinprüfstand ähnlich DIN 4102 Teil 8 erfolgt, war das 1. Ziel der Untersuchungen

- den im Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig vorhandenen Kleinprüfstand brandschutztechnisch auszumessen und
- in diesem Kleinprüfstand die Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen als Funktion der Brennstoffzufuhr (Fremdbrandlast) zu ermitteln sowie
- die festgestellten Abbrandgeschwindigkeiten mit bekannten Abbrandgeschwindigkeiten aus Großversuchen zu vergleichen.

Das 2. Ziel war die Feststellung der Feuerwiderstandsdauer in Großversuchen, ebenfalls in Abhängigkeit von der Brennstoffzufuhr (Fremdbrandlast). Dabei wurden untersucht:

- Eine tragende brett-schichtverleimte Holzstütze,
- eine tragende raumabschließende Wand aus Holztafeln, die als Wohnungstrennwand zum Einsatz kommen kann, und
- eine tragende nichtraumabschließende Wand aus Holztafeln, die i.a. als tragende Innenwand verwendet wird.

Die vorstehend aufgezählten Holzbauteile wurden in den üblichen Bauteilprüfständen untersucht, wobei als Brennstoffzufuhr jeweils jene Fremdbrandlast gewählt wurde, die notwendig ist, um bei vergleichbaren Stahlbetonbauteilen die ETK zu erzeugen.

3 Kleinbrandversuche

3.1 Übersicht über das Versuchsprogramm

Für das brandschutztechnische Ausmessen eines Kleinprüfstandes und zur Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von der Brennstoffzufuhr (Fremdbrandlast) wurden insgesamt 13 orientierende Kleinversuche durchgeführt. Eine Übersicht über das Versuchsprogramm enthält Bild 5.

Die Versuche 1 - 3 dienten zur Bestimmung der Brennstoffzufuhr, die notwendig ist, um im vorhandenen Kleinprüfstand in verschiedenen Meßebenen die ETK zu erzeugen.

Die Versuche 4 und 5 dienten zur Bestimmung der Brennstoffzufuhr, die notwendig ist, um in der obersten Meßebene die Hydrocarbon-Temperatur-Zeitbeanspruchung zu erzeugen.

Die Versuche 6 bis 13 dienten zur Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen in Abhängigkeit von der Brennstoffzufuhr, insbesondere wie sie in den Versuchen 1 bis 5 ermittelt wurde.

Bild 5: Übersicht über das Versuchsprogramm der orientierenden Kleinversuche

Ver- suchs- Nr.	Øl-Brennstoffzufuhr (Fremdbrandlast)	Einbau von Holz- bauteilen (Eigenbrandlast)	Meßebene für die Temp.- Steuerung	Brandraum- temperaturen 1)
1	$q_{1.1}$	-	unten	ETK
2	$q_{1.2}$	-	Mitte	ETK
3	$q_{1.3}$	-	oben	ETK
4	q_2	-	oben	Hdc > ETK
5	q_2	-	oben	Hdc > ETK
6	q_0 3)	Spanplatten	oben	> ETK
7	q_0 3)	Spanplatten	oben	> ETK
8	$q_{1.3}$	Spanplatten	oben	> ETK
9	q_2	Spanplatten	oben	\geq Hdc
10	q_2	Spanplatten	oben	\geq Hdc
11	$q_{1.3}$	Balken	oben	\sim ETK
12	$q_{1.3}$	Balken + Spanplatten ²⁾	oben	> ETK
13	q_0 3)	Balken + Spanplatten ²⁾	oben	> ETK

1) ETK = Einheitstemperaturzeitkurve
Hdc = Hydrocarbonkurve } vgl. Abschnitt 3.2.2

2) In Teilbereichen wurden anstelle der Spanplatten Holzbohlen verwendet, vgl. Abschnitt 3.2.4.2

3) Erläuterungen zu q_0 siehe Abschnitt 3.3 (Seite 13)

3.2 Durchführung der Versuche

3.2.1 Abmessungen des Prüfofens, Ölbrenner

Der für die Kleinversuche verwendete Prüfstand hatte eine Grundfläche von $B \times L = 100 \text{ cm} \times 150 \text{ cm}$ und eine Höhe von $H = 150 \text{ cm}$. An der Vorderseite waren 2 Ölbrenner angeordnet. Die Brennerachsen lagen 83 cm oberhalb des Fußbodens und damit 67 cm unterhalb der Ofendecke; der Abstand der Brennerachsen zu den Seitenwänden betrug $e = 20 \text{ cm}$, vgl. DIN 4102 Teil 8. An der Hinterseite - den Brennern gegenüberliegend - waren zwei Abzugsöffnungen angeordnet.

Als Ölbrenner kamen Ölzerstäubungsbrenner nach dem Prinzip der Ölzerstäubung durch Druckluft gemäß DIN 4787 der Firma Körting, Hannover, zum Einsatz.

3.2.2 Meßebenen, Brandraumtemperaturen

Die Brandraumtemperaturen wurden in 3 Meßebenen gesteuert bzw. registriert:

- Untere Meßebene : 15 cm oberhalb des Brandraumfußbodens,
jeweils 7 Meßstellen.
- Mittlere Meßebene: 22,5 cm oberhalb der Brennerachsen,
jeweils 3 Meßstellen in der Mitte der Ofenlängsachse; 2 dieser Meßstellen entsprachen annähernd den Meßstellen, wie sie in DIN 4102 Teil 8 festgelegt sind.
- Obere Meßebene : 15 cm unterhalb der Brandraumdecke,
jeweils 7 Meßstellen.

Bei den Versuchen 11 - 13 wurde die Lage der Meßstellen der oberen Meßebenen geringfügig variiert, um 30 cm hohe Holzbalken einbauen zu können. Die in Abschnitt 3.2.1 beschriebene Brandraumhöhe $H = 150 \text{ cm}$ wurde bei diesen Versuchen beibehalten; der Holzbalken wurde durch Ausblatten in den Ofen eingehängt, so daß das Ofenvolumen etwas verkleinert wurde.

Bei den Versuchen 6 bis 13 wurden entsprechend den Angaben von Abschnitt 3.2.4.2 Spanplatten bzw. Holzbohlen von 5 cm Dicke eingebaut. Der Abstand der Brandraum-Temperaturmeßstellen zur "Bauteiloberfläche" betrug bei diesen Prüfungen bei Prüfbeginn entsprechend DIN 4102 Teil 2 damit jeweils 10 cm.

Die verwendeten Thermoelemente entsprachen DIN 4102 Teil 2.

Als Brandraumtemperaturzeitkurven wurden verwendet:

- ETK = Einheitstemperaturzeitkurve entsprechend DIN 4102 Teil 2,
- Hdc = Hydrocarbon-Temperaturzeitkurve entsprechend
 - a) Linde Spezifikation S - SD 153 bzw.
 - b) Norwegian Petroleum Directorate 1981 (NPD) bzw.
 - c) Nordtest method, NT Fire 021.

Die Hdc-Kurven der Punkte a) bis c) weichen nur unwesentlich voneinander ab. Der Temperaturzeitverlauf wird in ISO 834 - Neufassung [5] - und ggf. in eine Neufassung von DIN 4102 als Kurve für Sonderbeanspruchungen aufgenommen.

Die vorstehend beschriebenen Temperaturzeitkurven sind in Bild 6 dargestellt.

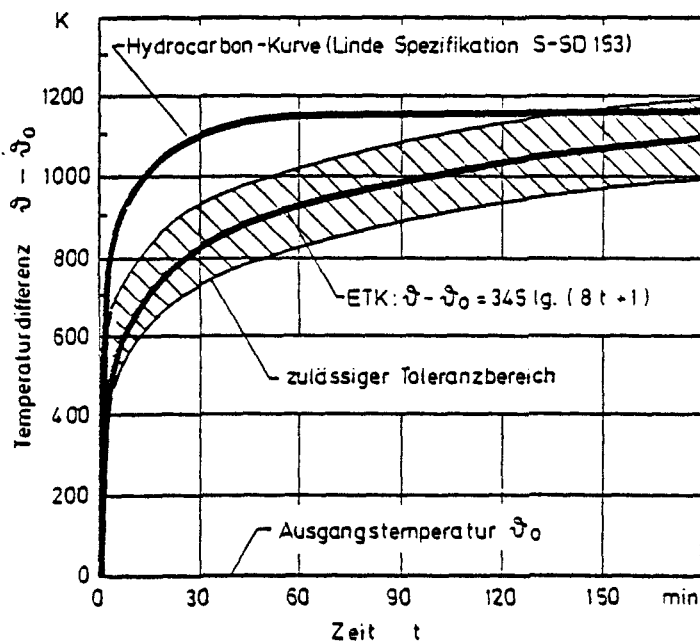


Bild 6:

Brandraum-Temperaturzeitkurven
ETK und Hdc

3.2.3_Druck_im_Prüfofen

Die Versuche wurden so durchgeführt, daß der Überdruck im Brandraum - jeweils in Höhe der oberen Temperaturmeßebeine gemessen - bei allen Versuchen entsprechend DIN 4102 Teil 2 im Bereich von (10 ± 2) Pa lag.

3.2.4_Ofenauskleidung

3.2.4 1 Schamottemauerwerk, Gasbeton-Decke

Der Versuchsofen bestand aus Schamottemauerwerk; in einigen Teilbereichen war Feuerbeton vorhanden. Als Ofenabdeckung wurde eine Decke aus Gasbetonplatten in 10 cm Dicke der Festigkeitsklasse GB 4,4 DIN 4223 verwendet. Die Ofenauskleidung erfüllt damit die Anforderungen, wie sie nach ISO 834 - Neufassung [5] - und nach DIN 4102 Teil 8 gestellt werden.

3.2.4.2 Spanplatten, Holzbohlen und Holzbalken; Holztemperaturen
Bei den Versuchen 6 bis 10 wurden die Ofenlängsseiten sowie der Decken- und Bodenbereich mit Spanplatten nach DIN 68 763 ausgekleidet. Es wurden jeweils 2 x 25 mm dicke Platten verwendet, die miteinander verdübelt wurden.

Bei den Versuchen 11 bis 13 wurde in der Ofenlängsachse im Deckenbereich jeweils ein Balken b/h = 300 mm/300 mm aus brett-schicht-verleimtem Nadelholz im unbelasteten Zustand angeordnet. Die seitlich freiliegenden Deckenflächen von jeweils 35 cm Breite wurden bei Versuch 11 mit Gasbetonplatten so abgedeckt, daß der Balken dreiseitig beflammt wurde; im übrigen blieb der Ofen frei von brennbarer Auskleidung. Bei den Versuchen 12 und 13 wurden die Ofenwände dagegen wie bei den Versuchen 6 bis 10 zusätzlich zur Anordnung der Balken ausgekleidet; im verbleibenden Deckenbereich sowie bei einer Längsseite wurden anstelle der 2 x 25 = 50 mm dicken Spanplatten jedoch 50 mm dicke Holzbohlen aus Fichtenholz angeordnet.

Die Rohdichte der Spanplatten lag zwischen 660 kg/m³ und 680 kg/m³, die des Fichtenholzes im Mittel bei 470 kg/m³. Der Feuchtigkeitsgehalt schwankte zwischen 9 Gew.-% und 12 Gew.-%.

In den Balken wurden durch von oben angebrachte Bohrlöcher im mittleren Balkenbereich 3 Meßketten von Thermoelementen

- an der rechten Seite,
- an der linken Seite und
- an der Balkenunterseite

so angeordnet, daß die Holztemperaturen in Abständen von 10 mm bis zu einer Tiefe von 80 mm gemessen werden konnten.

Bei den Spanplatten und Holzbohlen wurden die "Holztemperaturen" in Abständen von 5 mm in ganzer Bekleidungsdicke gemessen. Die Meßstellen - durch Bohrlöcher von außen angebracht - lagen in einem 100 mm x 100 mm großen Bereich in den Seitenauskleidungen in Höhe der mittleren Ebene der Brandraumtemperaturmeßstellen, d.h. 22,5 cm oberhalb der Brennerachsen in der Mitte der Längsseiten.

3.3 Öl-Verbrauch und -Steuerung, Brandgasanalysen

Bei den Versuchen 1 bis 3 wurde die Brennstoffzufuhr q (leichtes Heizöl entsprechend den Angaben von DIN 4102 Teil 2) so geregelt, daß in den Meßebenen - vgl. Abschnitt 3.2.2 - jeweils die ETK erzeugt wurde. Dazu waren bei Steuerung nach der

- unteren Meßebe $q_{1.1} \sim 0,76 \text{ l/min,}$
- mittleren Meßebe $q_{1.2} \sim 0,39 \text{ l/min}$ und nach der
- oberen Meßebe $q_{1.3} \sim 0,4 \text{ l/min}$

Ölzufuhr erforderlich. Da im vorhandenen Kleinprüfstand häufig Deckenbauteile geprüft werden und da die Brennstoffzufuhr zur Steuerung der ETK zwischen mittlerer und oberer Meßebe keine bedeutenden Unterschiede zeigte, wurde festgelegt, bei den Versuchen 8, 11 und 12 als Fremdbrandlast die Ölzufuhr $q_{1.3}$ zu verwenden, vgl. Bild 5.

Bei den Versuchen 4 und 5 wurde zur Erzeugung der Hydrocarbon-Temperaturzeitkurve in der oberen Meßebe eine Ölzufuhr von $q_2 \sim 2 \text{ l/min,}$ d.h. die 5-fache Menge von $q_{1.3}$ erforderlich.

Bei den Versuchen 6, 7 und 13 (Versuche mit brennbarer Auskleidung, vgl. Bild 5) war angestrebt worden, die ETK zu erzeugen. Nach einem Ölverbrauch $q_0 \sim 0,2 \text{ l/min}$ in den ersten 10 Versuchsminuten erfolgte der Abbrand der Auskleidung so rasant, daß

- die Ölbrenner ganz abgeschaltet werden mußten und
- die Brandraumtemperaturen trotz abgeschalteter Ölzufuhr außer Kontrolle gerieten ($T > T_{ETK}$).

Erst nach dem Abbrand der Haupt-Eigenbrandlast ($t \sim 40 \text{ min}$) wurden die Brenner neu gezündet; zur Erzeugung der ETK waren dann wieder $q_{1,3} \sim 0,4 \text{ l/min}$ erforderlich.

Der Ölmenge-Verbrauch (Fremdbrandlast) ist in Bild 7 schematisch dargestellt.

Während der Versuche 1 bis 10 wurden Brandgasanalysen durchgeführt. Dabei wurden in der mittleren Meßebene in Brandraummitte der

- O_2 - Gehalt,
- CO_2 - Gehalt und der
- CO - Gehalt

gemessen.

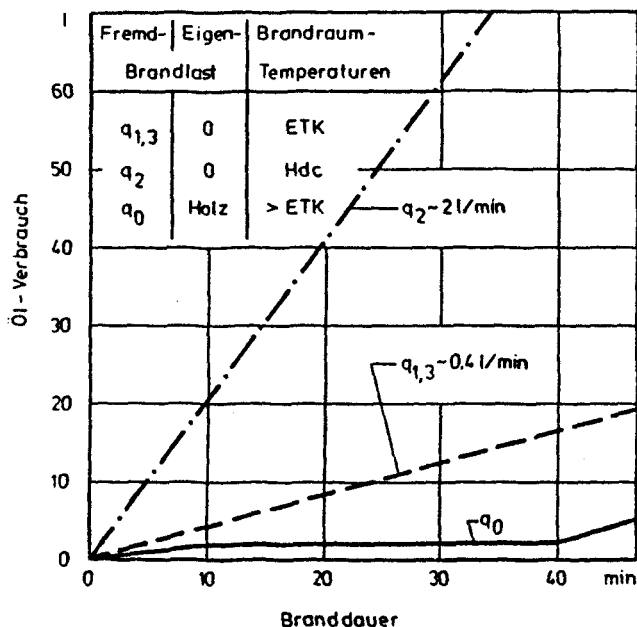


Bild 7:

Öl-Verbrauch bzw. Öl-Brennstoff-zufuhr $q_{1,3}$, q_2 und q_0

3.4 Versuchsergebnisse

3.4.1 Brandraumtemperaturen

Bei den Versuchen 1 - 3 ohne Eigenbrandlast folgte der Temperaturverlauf wie beabsichtigt der ETK. Auch bei Versuch 11 mit der relativ geringen Eigenbrandlast eines Holzbalkens wurde bei dem vorgegebenen Ölverbrauch $q_{1,3}$ die ETK erzeugt; die Brandraumtemperaturen stiegen nicht wesentlich über die ETK an!

Bei den Versuchen 4 und 5 ohne Eigenbrandlast folgte der Temperaturzeitverlauf wie beabsichtigt der Hydrocarbonkurve.

Bei den Versuchen 6 - 10 und 12 -13 mit großer Eigenbrandlast ergaben sich im Vergleich hierzu folgende Temperaturzeitverläufe (Bild 8):

Bei den Versuchen 6 - 7 mit der sehr kleinen Fremdbrandlast q_0 und bei Versuch 8 mit der "üblichen" Fremdbrandlast $q_{1,3}$ ergaben sich hinsichtlich der Brandraumtemperaturen nur unbedeutende Unterschiede. Die Brandraumtemperaturen waren wesentlich größer als die Temperaturen der ETK. Sie lagen in den ersten 20 Minuten nahe der H_{dc} , sanken nach dem Abfallen von Spanplattenteilen der ersten Schicht auf die Temperaturen der ETK ab und stiegen nach dem Weiterbrennen der zweiten Spanplattenschicht wieder an. Nach dem Abfallen der gesamten restlichen Spanplatten trat ein Temperatureinbruch bis $T \sim 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ auf, der aber innerhalb von rd. 3 - 5 Minuten wieder ausgeglichen wurde. Die Temperaturen stiegen infolge des auf dem Brandraumboden liegenden Gluthaufens und der Fremdbrandlast $q_{1,3}$ danach wieder über die ETK an, blieben aber im wesentlichen im Toleranzbereich der ETK.

Bei den Versuchen 12 - 13, bei denen nur eine Seite und der Boden aus zusammengesetzten Spanplatten bestanden - die anderen Seiten bestanden aus "ungeteiltem" Fichtenholz - waren das erste Absinken der Temperaturen und der Temperatureinbruch wesentlich schwächer ausgebildet. Die Temperaturen sanken beim Zusammenbruch

der Bekleidung nur auf die ETK ab und stiegen danach infolge des weiterbrennenden massigen Holzbalkens bis auf die Temperaturen der Hdc wieder an.

Bei Versuch 9 mit der großen Fremdbrandlast q_2 folgten die Temperaturen nahezu der Hdc. Mit dem Zusammenbruch der gesamten Spanplattenbekleidung fand auch hier ein Temperatureinbruch statt ($T \rightarrow 300^\circ\text{C}$), der jedoch infolge des schnelleren Abbrandes rd. 15 Minuten früher auftrat als bei den Versuchen 6 - 8. Nach dem Zusammenbruch der Spanplatten stiegen die Temperaturen weit über die Hdc an und erreichten rd. 1300°C .

Bei Versuch 10, der als Wiederholungsversuch zu Versuch 9 geplant war, wurde im Zeitbereich von 10 bis 30 Minuten bei konstanter Fremdbrandlast q_2 der Sauerstoffgehalt im Ofen durch Frischluftzufuhr gesteigert. Dadurch sanken die Temperaturen und erreichten nicht die Hdc. Der Zusammenbruch der Spanplatten und der Temperatureinbruch traten rd. 5 Minuten später auf. Nach Drosselung der Frischluftzufuhr auf das Maß wie bei Versuch 9 stiegen die Temperaturen wieder über die Hdc an und erreichten auch hier rd. 1300°C .

Der Mittelwert der Temperaturen der Meßstellen 3 - 5 in Ofenmitte in der oberen Meßebene sind im Prinzip in Bild 8 dargestellt.

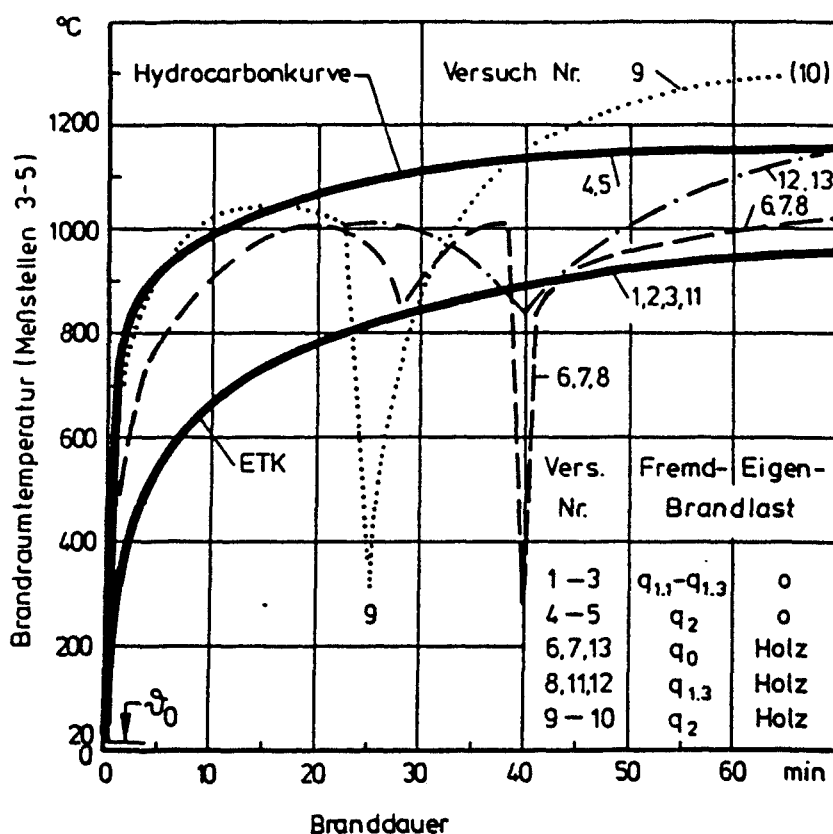


Bild 8:
Brandraumtemperaturen
bei den Versuchen 1-13
mit q_0 , $q_{1,3}$ und q_2

3.4.2. Brandgasanalysen

Während der Versuche sank der Sauerstoffgehalt von 21 % bei Vers. 1 - 3 (q_1 ohne Holz) auf Werte von 2 % bis 6 %, bei Vers. 4 - 5 (q_2 ohne Holz) auf Werte von 1 % bis 2 %, bei Vers. 6 - 7 (q_0 mit Holz) auf Werte von rd. 2 %, bei Vers. 8 ($q_{1.3}$ mit Holz) auf Werte von rd. 1 % und bei Vers. 9 - 10 (q_2 mit Holz) auf Werte von 3 % bis 4 %, wobei bei Versuch 10 der Sauerstoffgehalt zwischen der 10. und 30. Minute durch Frischluftzufuhr bewußt auf rd. 12 % angehoben wurde.

Der CO_2 -Gehalt stieg mit sinkendem O_2 -Gehalt je nach Versuchsdauer und Brandgeschehen auf Werte zwischen 8 % und 24 %. Der CO-Gehalt lag bei den Versuchen ohne Eigenbrandlast bei 0 und bei den Versuchen mit Eigenbrandlast je nach Versuchsdauer und Brandgeschehen zwischen 0,4 % und rd. 1,0 %.

Es ist anzunehmen, daß bei den Versuchen 11 - 13, bei denen keine Brandgasanalysen durchgeführt wurden, ähnliche Werte vorlagen.

3.4.3. Temperaturen in den Holzbauteilen

Die Temperaturen in den Holzbauteilen - d.h.

- in den Spanplatten bzw. Fichtenholzbohlen (Versuche 6 - 10 und 12 - 13) sowie
- in den Holzbalken (Versuche 11 - 13)

wurden an zahlreichen Stellen gemessen, vgl. Abschnitt 3.2.4.2. Die Holztemperaturen in Abhängigkeit von der Branddauer sind beispielhaft in Bild 9 dargestellt. Die dort abgebildete Kurve ① zeigt bei etwa 100 °C einen Haltepunkt, der durch die Holzfeuchte verursacht wurde. Er war meist schwach ausgebildet und verlief in der Regel über eine Zeitdauer von < 10 Minuten. Die als Beispiel abgebildete Kurve ② zeigt einen Temperaturzeitverlauf ohne ausgeprägten Haltepunkt.

Nach dem Abbrand der Holzschichten bis zur jeweiligen Temperaturmeßstelle erfolgte eine Temperaturangleichung an die jeweilige Brandraumtemperatur, die in Bild 9 nur schematisch dargestellt ist.

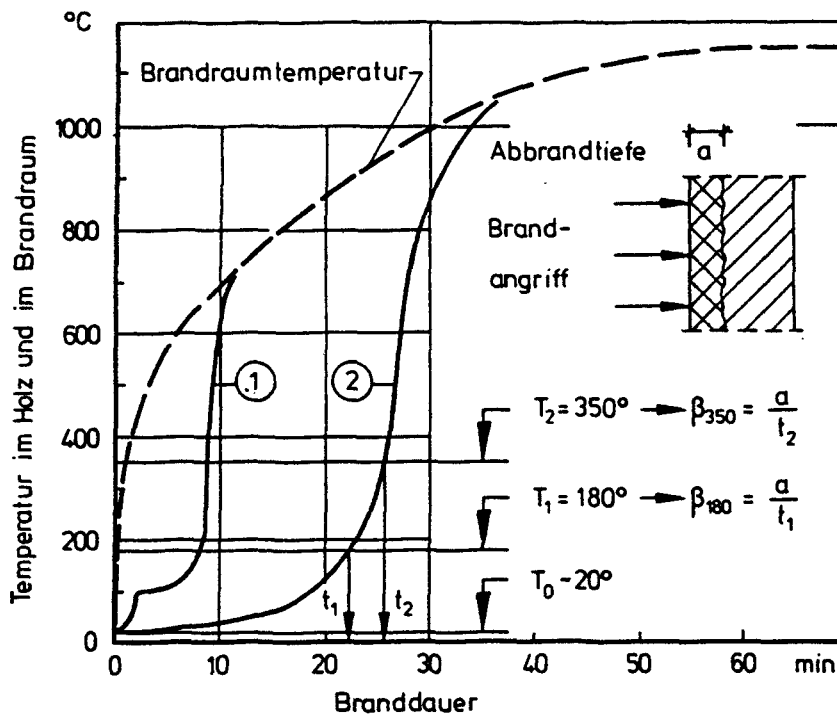


Bild 9:

Beispiele für die Temperaturzeitverläufe in den untersuchten Holzbauteilen; Ermittlung der Abbrandgeschwindigkeit β bei 180°C und 350°C, vgl. Abschnitt 3.4.4

3.4.4 Ermittlung der Abbrandgeschwindigkeit

Aus den Temperaturzeitverläufen wurde die Abbrandgeschwindigkeit ermittelt, vgl. Kurve ② in Bild 9. Dazu wurde die Holzüberdeckung der jeweiligen Temperaturmeßstelle im Holzbauteil der Abbrandtiefe a , wie sie üblicherweise durch Herausnehmen von Proben mit anschließendem Ablöschen und Ausmessen der verkohlten Schicht bestimmt wird, gleichgesetzt. Um bei diesem Verfahren die wahre Abbrandtiefe zu erfassen, wurden die Zeitpunkte t_1 und t_2 verwendet, bei denen die Holztemperaturen jeweils 180 °C und 350 °C betrugen. Die Differenz $(t_2 - t_1)$ war in der Regel ≤ 5 Min., vgl. Bilder 10 und 11.

Aus der Steigung der Kurven wurde die Abbrandgeschwindigkeit bestimmt, wobei für die Auswertungen linearisierte Kurven - d.h. Geraden - gewählt wurden. Wegen des Abfallens von Spanplatten-schichten ergaben sich meistens zwei Abbrandgeschwindigkeiten - nämlich

- $\beta_{0'-20'}$ = in den ersten 20 Minuten festgestellte Abbrandgeschwindigkeit und
- $\beta_{20'-30'}$ = in der letzten Prüfphase (> 20 Minuten) festgestellte Abbrandgeschwindigkeit; sie bezieht sich meist auf den Zeitraum zwischen 20 Minuten und 30 Minuten, vgl. Bilder 10 und 11).

Bei den massigeren Holzbalken (Versuche 11 - 13) konnte die Abbrandgeschwindigkeit über einen längeren Zeitraum festgestellt werden. Die Abbrandgeschwindigkeit wurde dabei in der Regel aus der Steigung nur einer Geraden - entsprechend den linearisierten Kurvenverläufen - bis etwa 90 min Prüfdauer ermittelt → $\beta_{0'-90'}$ (vgl. Bild 12).

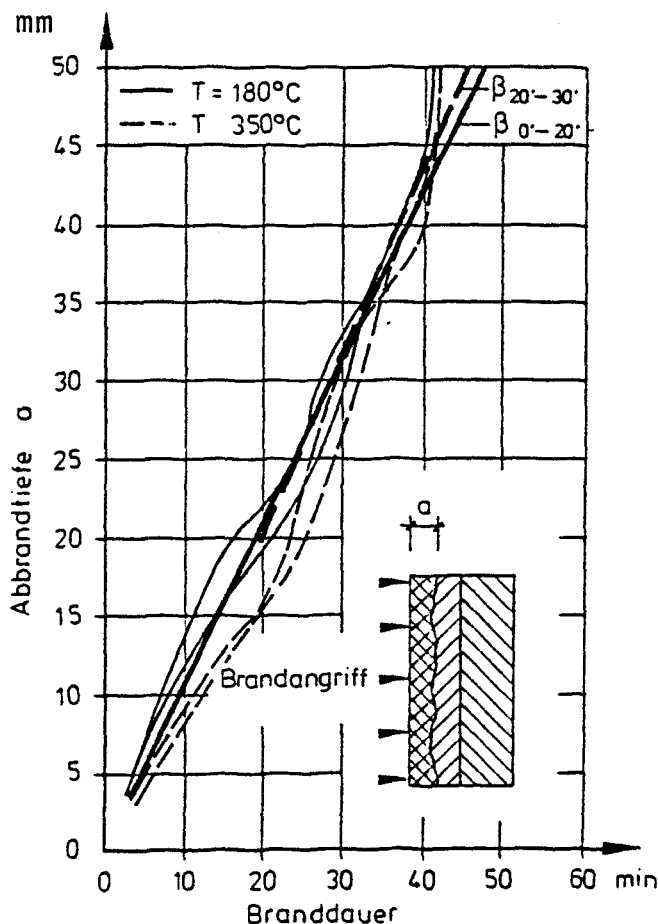


Bild 10: Versuch 6

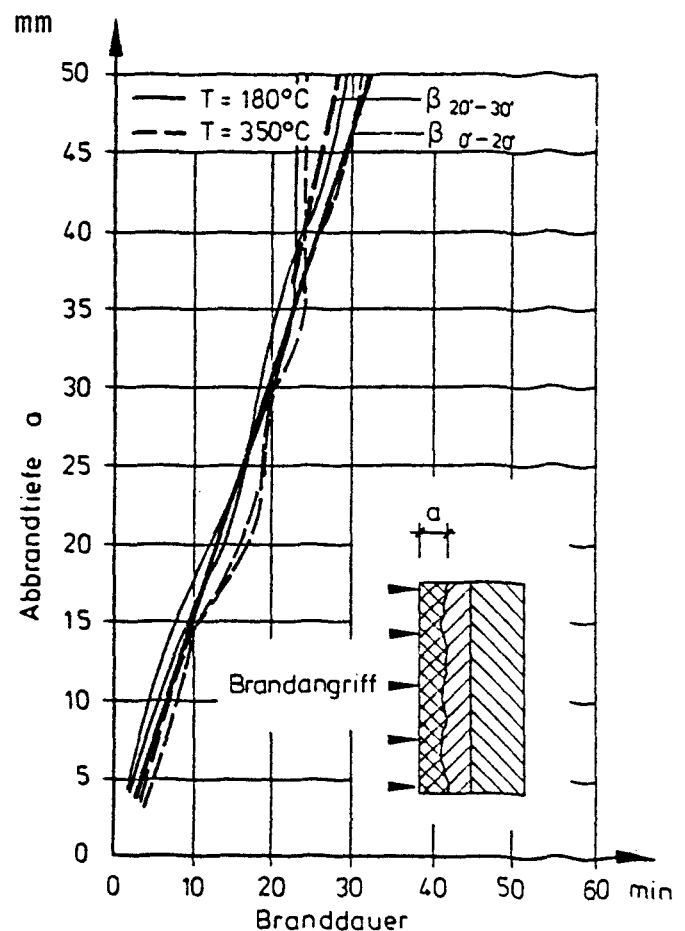


Bild 11: Versuch 9

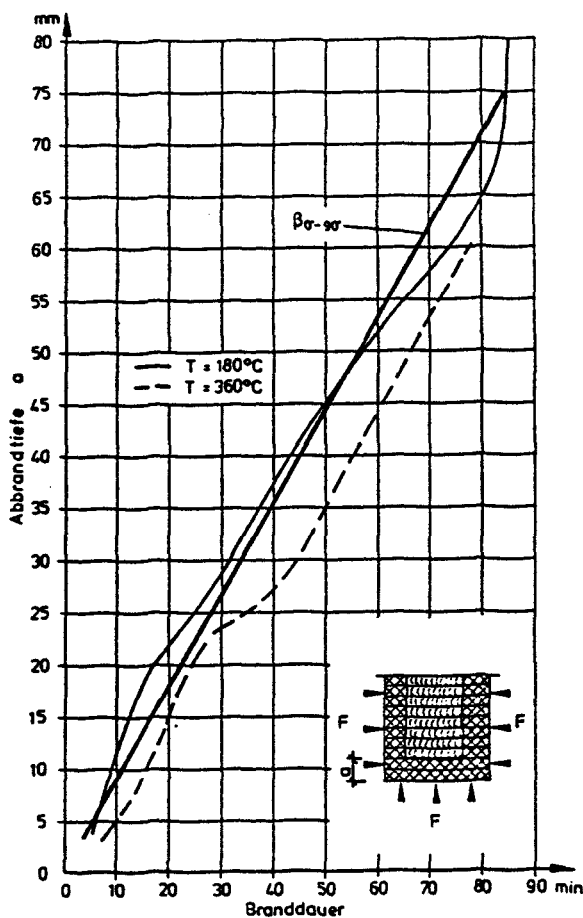


Bild 12:

Versuch 13, unterer Abbrand

Bild 10 - 12:

Abbrandtiefe $a = f(t)$ für
 t_1 mit $T = 180^\circ\text{C}$ und
 t_2 mit $T = 350^\circ\text{C}$ mit
 linearisierten Mittelwerten;

→ Abbrandgeschwindigkeiten
 $\beta_{0'-20'}$, $\beta_{20'-30'}$ und $\beta_{0'-90'}$

3.4.5 Vergleich der Abbrandgeschwindigkeiten

Der Vergleich der Abbrandgeschwindigkeiten, wie sie in den Kleinversuchen festgestellt wurden, zeigt folgendes:

a) Die Abbrandgeschwindigkeit a/t_1 entspricht der Abbrandgeschwindigkeit a/t_2 . Das heißt, daß es gleichgültig ist, ob die Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit bei $T_1 = 180^\circ\text{C}$ oder $T_2 = 350^\circ\text{C}$ erfolgt.

b) Die Abbrandgeschwindigkeit β ist bei den hier durchgeführten Kleinversuchen mit zusammengesetzten Spanplatten in den ersten 20 Minuten kleiner als in den folgenden Prüfminuten ($\rightarrow \beta_{0'-20'}$). Die mit $\beta_{20'-30'}$ bezeichnete Abbrandgeschwindigkeit für Prüfzeiten > 20 Minuten ist bei kleiner Fremdbrandlast etwa $0,2 \text{ mm/min}$ und bei großer Fremdbrandlast q_2 etwa $0,4 \text{ mm/min}$ größer als $\beta_{0'-20'}$, vgl. Bild 13.

Da dieser Unterschied bei den β -Werten der Holzbalken und Holzbohlen (Versuche 11 - 13) nicht auftrat, wird gefolgert, daß die Differenzen auf dem Abfallen von Spanplattenschichten der zusammengesetzten Probekörper beruhen. Die größere Abbrandgeschwindigkeit $\beta_{20'-30'}$ wird in den folgenden Vergleichen daher nicht mehr herangezogen.

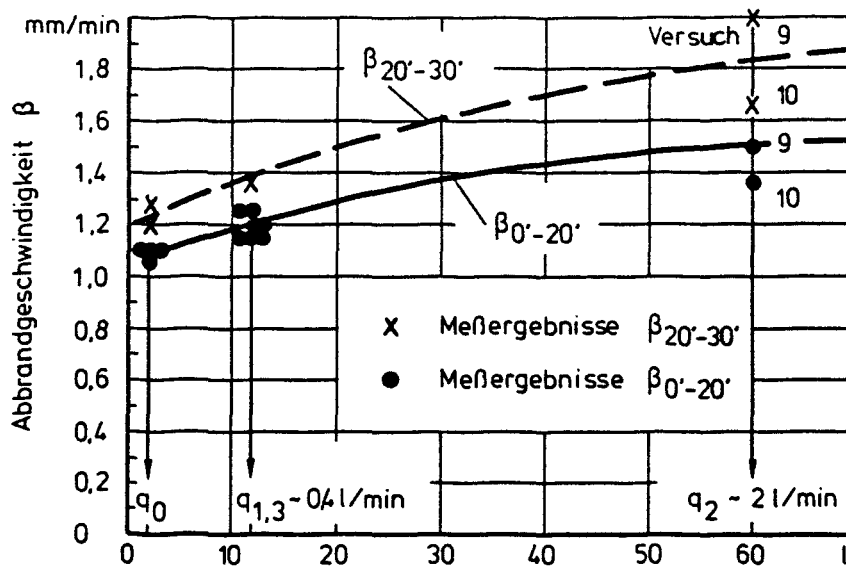
c) Die Abbrandgeschwindigkeit $\beta_{0'-20'}$ der seitlich angeordneten Spanplatten entspricht der Abbrandgeschwindigkeit $\beta_{0'-20'}$ der seitlich angeordneten Holzbohlen.

d) Die Abbrandgeschwindigkeit an den Spanplatten und Holzbohlen steigt mit zunehmender Fremdbrandlast von 1,1 mm/min bei q_0 auf Werte von rd. 1,5 mm/min bei q_2 , vgl. Bild 13.

e) Die Zugabe von Verbrennungsluft (Erhöhung des Sauerstoffgehaltes von rd. 3 % auf max. 12 %) ergab bei etwas niedrigeren Brandraumtemperaturen (vgl. Abschn. 3.4.1) eine um rd. 0,2 mm/min kleinere Abbrandgeschwindigkeit, siehe Versuche 9 und 10 in Bild 13.

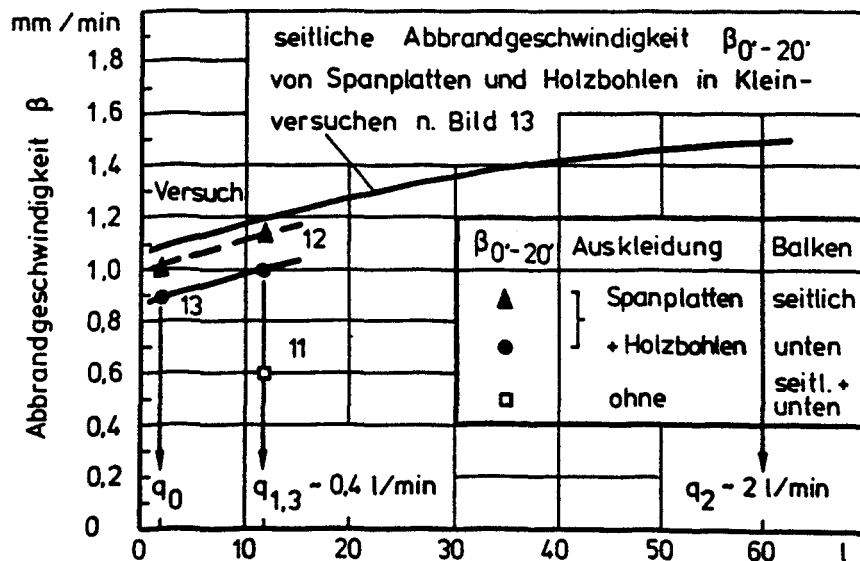
f) Bei nicht durch Spanplatten bzw. Holzbohlen ausgekleidetem Brandraum beträgt die seitliche sowie untere Abbrandgeschwindigkeit unbelasteter Holzbalken im vorliegenden Kleinprüfstand 0,6 mm/min, vgl. Bild 14, Versuch 11. Das heißt: Bei relativ kleiner Eigenbrandlast und üblicher Fremdbrandlast $q_{1,3}$ ist die Abbrandgeschwindigkeit unbelasteter Holzbalken kleiner als in Normprüfungen nach DIN 4102 (Brandraumgrundfläche i.a. $B \times L = 2,0 \text{ m} \times 4,0 \text{ m}$) und damit auch kleiner als die in Bild 1 angegebenen vergleichbaren Rechenwerte, siehe auch [2].

g) Wird die Eigenbrandlast durch eine Auskleidung mit Spanplatten bzw. Holzbohlen vergrößert (Versuche 12 - 13), dann steigt die Abbrandgeschwindigkeit unbelasteter Holzbalken bei gleicher Fremdbrandlast (q_0 und $q_{1,3}$) um $\geq 0,4 \text{ mm/min} \sim \text{rd. } 43 \%$ an, vgl. Bild 14. Die hier festgestellten Abbrandgeschwindigkeiten sind wegen des verkleinerten Brandraumes (vgl. Abschn. 3.2.2) maximal 0,2 mm/min



Fremdbrandlast = Ölverbrauch nach 30 min Branddauer

Bild 13: Abbrandgeschwindigkeit β von Fichtenholz und Spanplatten nach DIN 68 763 als Funktion der Fremdbrandlast (Ölverbrauch) bei seitlich angeordneten Prüfkörpern in Kleinversuchen nach Abschnitt 3



Fremdbrandlast = Ölverbrauch nach 30 min Branddauer

Bild 14: Abbrandgeschwindigkeit β von bretttschichtverleimten Holzbalken aus Fichtenholz als Funktion der Fremdbrandlast (Ölverbrauch) in Kleinversuchen nach Abschnitt 3 im Vergleich zur seitlichen Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen gemäß Bild 13

kleiner als die vergleichbaren Abbrandgeschwindigkeiten, die in den Spanplatten und Holzbohlen der Versuche 6 - 10 und 12 - 13 gemessen wurden.

Die Unterschiede zwischen unterer und seitlicher Abbrandgeschwindigkeit an den Holzbalken werden auf die brandraumspezifischen Randbedingungen (Brandraumgröße, Lage der Meßstellen, Lage der Ölbrenner usw.) der hier durchgeführten Kleinversuche zurückgeführt.

h) Zusammenfassend kann zu den durchgeführten Kleinversuchen gesagt werden, daß die Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen u.a. von folgenden Einflußgrößen abhängt:

- Größe des Brandraumes,
- Lage der Ölbrenner zu den Meßquerschnitten für Bauteiltemperaturen und Abbrandtiefe,
- Größe der Fremdbrandlast (Ölzufuhr),
- Größe der Eigenbrandlast, auch bei konstanter Fremdbrandlast, und
- Höhe des Sauerstoffgehaltes der Verbrennungsluft.

Die vorstehend aufgezählten wichtigsten Parameter konnten teilweise quantifiziert werden, vgl. Bilder 13 und 14. Dazu ist zu bemerken, daß die Prüfergebnisse zunächst nur für den hier zur Verfügung stehenden Kleinprüfstand gelten und erst nach weiteren Untersuchungen auf andere Bauteile übertragbar sind, vgl. Abschnitte 4 und 5.

4. Großversuche

4.1 Prüfung einer tragenden Holzstütze

4.1.1 Probekörper und Prüfungsdurchführung

Zur Feststellung der Feuerwiderstandsdauer einer Holzstütze in Abhängigkeit von der Fremdbrandlast (Ölverbrauch) wurde eine

brettschichtverleimte Holzstütze aus Fichtenholz der Güteklasse I nach DIN 4074 mit einem Querschnitt von 300 mm/300 mm ausgewählt, weil

- die Feuerwiderstandsdauer einer solchen Stütze in Normversuchen nach DIN 4102 Teil 2 bekannt ist und
- der Ölverbrauch für solche Stützenquerschnitte für Normversuche sowohl für Holzstützen als auch für Stahlbetonstützen vorliegt.

Die Kennwerte der untersuchten Stütze sind in Bild 15 im Vergleich zu anderen Stützen wiedergegeben.

Die Rohdichte der untersuchten Stütze betrug 470 kg/m^3 , der Feuchtigkeitsgehalt rd. 8 Gew.-%. Die Belastung erfolgte mittig bei einer Stützenlänge von 3700 mm; die Prüflast wurde normgemäß nach Euler-Fall 2 wie folgt ermittelt:

$$s_k = 1,0 \text{ s} = 370 \text{ cm},$$

$$A = 900 \text{ cm}^2; J = 67\,500 \text{ cm}^4,$$

$$i = \sqrt{\frac{J}{A}} = 8,66 \text{ cm},$$

$$\lambda = 370/8,66 = 42,7 \text{ cm} \rightarrow \omega \sim 1,3 \text{ und}$$

$$N = \frac{z_{ul\sigma} \cdot A}{\omega} = \frac{11 \cdot 900}{1,3 \cdot 10} = 761 \text{ kN}.$$

Der Einbau der Stütze erfolgte so, daß die Stützenenden oben und unten stumpf - d.h. weitgehend verdrehungsbehindert - gegen das Belastungsgerüst gepreßt wurden. Der Einbau entsprach damit praktisch dem Euler-Fall 4. Durch die Steifigkeit des Belastungsgerüsts und den gewählten Einbau lag tatsächlich aber eine Lagerung vor, die zwischen den Euler-Fällen 3 und 4 liegt.

Der Prüfofen mit den Abmessungen $B/L/H = 3600/3600/3600$ wurde mit 6 Ölbrennern beflammt. Die Fremdbrandlast (Ölzufuhr) wurde mit $q_B = 7,1 \text{ l/min}$ so gewählt, wie sie für die Normprüfung einer gleichgroßen Stahlbetonstütze erforderlich ist. Die Fremdbrandlast war damit um $1,1 \text{ l/min} \sim 18 \%$ größer als die für Normprüfungen von entsprechenden Holzstützen für die Erzeugung der ETK notwendige Fremdbrandlast von $q_H = 6,0 \text{ l/min} (\sim 100 \%)$, vgl. Bild 15.

Für die Durchführung der Prüfung wurden im übrigen die Bestimmungen von DIN 4102 Teil 2 (9/1977) eingehalten.

Parallel zur belasteten Prüfstütze wurde ein unbelasteter Stützenabschnitt von 1 m Länge in den Prüfofen gestellt, nach 40 Minuten Branddauer herausgezogen und abgelöscht; danach wurde die Abbrandtiefe gemessen und die Abbrandgeschwindigkeit linear ermittelt, vgl. Bild 15.

Bild 15: Zusammenstellung der Kennwerte vergleichbarer Stützen

Spalte	1		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zeile	Baustoff - Stütze		Querschnitt d/b	Länge l	Stoffwerte σ_D E-Modul E		vorh. σ = zul. σ_D DIN 1053	Einbau gem. Euler-Fall	Fremd- brandlast = Ölverbrauch	Abbrand- geschwin- digkeit	Feuerwider- standsdauer
-	-		mm/mm	mm	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	-	l/min	mm/min	min
1	Beton-Vergleichsstütze		300/300	3700	-	-	-	-	7,1 ¹⁾	-	≥ 90 ⁵⁾
2	Holz-Vergleichsstützen		300/300	3700	46	12 230	11	3 - 4	6,0 ¹⁾	0,7	87 ²⁾³⁾
3			300/300	3700	46	12 230		4	6,0 ¹⁾	0,7	89 ³⁾
4			300/300	3700	46	13 000		4	6,0 ¹⁾	0,7	≥ 90 ²⁾³⁾
5			300/300	3700	46	13 000		4	7,1	1,2	53 ³⁾
6	Holzstütze gemäß Prüfprogramm	Vergleichs- Rechnung	300/300	3700	46	12 300		3 - 4	7,1	1,2	50 ³⁾
7			300/300	3700	46	12 230	4	7,1	1,2	52 ³⁾	
8		Probekörper	300/300	3700	46	12 230	3 - 4	7,1	nicht ermittelt	50	
9			300/300	1000	46	12 230	-	- ⁴⁾	7,1	1,1 - 1,2	- ⁴⁾

1) Fremdbrandlast zur Erzeugung der ETK

2) Ermittelt nach [2]: Feuerwiderstandsdauer gemäß Bild E.101 Euler-Fall 3 → 77'
+ Korrektur gem. Seite 178 Pkt. f) und g) → 8'
+ Korrektur für Euler-Fall 3 bis 4 statt 3 → 2'
Feuerwiderstandsdauer → 87 min

3) Ermittelt nach [2]: Rechnung gemäß Seite 174-175

4) Der Probekörper gemäß Zeile 9 diente nur zur Bestimmung der Abbrandgeschwindigkeit.

5) Entsprechend den Randbedingungen nach DIN 4102 Teil 4.

4.1.2. Prüfergebnisse

Die Brandraumtemperaturen erreichten bei der Fremdbrandlast $q_B = 7,1 \text{ kW/min}$ annähernd den Temperaturzeitverlauf der Hydrocarbonkurve, vgl. Bild 6.

Die Feuerwiderstandsdauer (Zeit bis zum Bruch) betrug 50 Minuten, vgl. Bild 15, Zeile 8. Die mit dem Probekörper gemäß Bild 15 (Zeile 9) ermittelte Abbrandgeschwindigkeit lag zwischen 1,1 und 1,2 mm/min und damit rd. 43 % höher als die entsprechende Abbrandgeschwindigkeit unter ETK-Bedingungen.

Vergleichsrechnungen mit einer Abbrandgeschwindigkeit von 1,2 mm/min ergaben unter den vorliegenden Randbedingungen eine Feuerwiderstandsdauer von 50 min bis 52 min, womit das Prüfergebnis bestätigt wurde, vgl. Bild 15, Zeilen 6 und 7.

Entsprechende, mehrfach abgesicherte Vergleichsrechnungen mit einer ETK-gemäßen Abbrandgeschwindigkeit von 0,7 mm/min ergaben Feuerwiderstandsdauern von 87 min bis 89 min, vgl. Bild 15, Zeilen 2 - 3.

Die mit einer Fremdbrandlast von $q_B = 7,1 \text{ kW/min}$ (ETK bei Stahlbetonstützen) erzielte Feuerwiderstandsdauer der Holzstütze lag damit um 37 min \sim 43 % niedriger als die Feuerwiderstandsdauer einer ETK-beflammten Holzstütze mit 87 min \sim 100 %.

Die Abnahme der Feuerwiderstandsdauer wird noch deutlicher, wenn man die Feuerwiderstandsdauer als Funktion der Abbrandgeschwindigkeit aufträgt, siehe Bild 16. Grundlage der dargestellten Kurve sind die in Bild 15 Zeile 3 bzw. 7 angegebenen Randbedingungen für den Euler-Fall 4.

Würde man einen nur um 770 N/mm^2 größeren E-Modul von $E = 13\,000 \text{ N/mm}^2$ wählen, wäre beim ETK-Versuch mit $q_H = 6,0 \text{ kW/min}$ F 90 erreicht worden, vgl. Bild 15, Zeile 4. Bei $q_B = 7,1 \text{ kW/min}$ (ETK-Betonstütze)

werden dagegen nur rd. 53 min erreicht (vgl. Bild 15, Zeile 5) - d.h.: Eine für F 90 nach DIN 4102 dimensionierte Holzstütze erreicht im vorliegenden Fall bei q_B nicht einmal F 60, sondern nur gut F 30. Bei einer Abbrandgeschwindigkeit von 1,8 mm/min, wie sie nach den Bildern 3 - 4 im Extremfall möglich ist [3], würde nicht einmal F 30 erreicht werden.

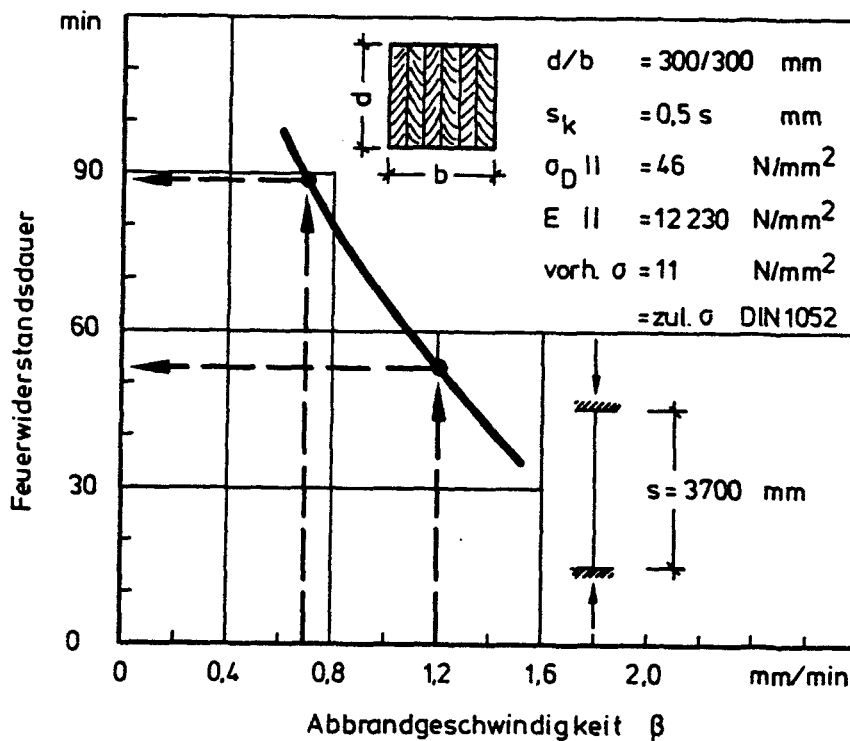


Bild 16:

Feuerwiderstandsdauer brettstichtverleimter Holzstützen als Funktion der Abbrandgeschwindigkeit; die Randbedingungen entsprechen den Angaben von Bild 15, Zeilen 3 und 7

4.2 Prüfung einer tragenden, raumabschließenden Holzwand

4.2.1 Probekörper und Prüfungsdurchführung

Zur Feststellung der Feuerwiderstandsdauer einer tragenden raumabschließenden Holzwand in Abhängigkeit von der Fremdbrandlast (Ölverbrauch) wurde eine Wand aus Holztafeln der Feuerwiderstandsklasse F 60 gemäß DIN 4102 Teil 4 (3/1981), Tabelle 48, Zeile 6, ausgewählt, weil

- die Feuerwiderstandsdauer einer solchen Wand bekannt ist,
- solche Wände z.B. in Nordrhein-Westfalen als Wohnungstrennwände erlaubt sind und
- der Ölverbrauch für raumabschließende Wände für Normversuche sowohl für Holzwände als auch für Stahlbetonwände vorliegt.

Die Kennwerte der untersuchten Wand sind in Bild 17 im Vergleich zu anderen Wänden wiedergegeben, vgl. Zeilen 1 bis 3.

Als Dämmschicht kamen Steinfaserplatten der Firma Deutsche Rock-wool der Baustoffklasse A 1 gemäß PA-III 4.29 mit $d = 40$ mm zum Einsatz, die zweilagig mit versetzten Stößen durch Stauchung stramm in das Holzfachwerk eingepaßt wurden.

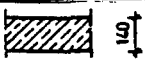
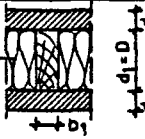
Der Probekörper mit den Abmessungen $B/H = 3000/3000$ mm wurde als raumabschließende Wand vor einem Wandprüfstand errichtet und mittig so belastet, daß die Holzrippen ohne Berücksichtigung der Beplanung eine Spannung von $\sigma_{D1} \approx 2,5$ N/mm² aufwiesen.

Der Prüfofen mit den Abmessungen $B/T/H = 4000/1500/3500$ mm wurde mit 3 Ölbrennern beflammt. Die Fremdbrandlast (Ölzufuhr) wurde mit $q_B = 3,2$ l/min so gewählt, wie sie für die Normprüfung einer gleichgroßen Stahlbetonwand erforderlich ist. Die Öl-Fremdbrandlast war damit um $1,8$ l/min ~ 23 % größer als die für Normprüfungen von entsprechenden Holzwänden für die Erzeugung der ETK notwendige Fremdbrandlast von $q_H = 1,4$ l/min (~ 100 %), vgl. Bild 17. In der Ofenlängsachse war mittig noch eine $1500/2700$ mm große Holzwand für die Prüfung einer zweiseitig beflamnten Wand angeordnet; sie wirkte als zusätzliche Brandlast. Über diese Wand wird in Abschnitt 4.3 weiter berichtet.

Der Druck im Prüfofen wurde bis zur 28. Minute entsprechend DIN 4102 Teil 2 mit (10 ± 2) Pa konstant gehalten. Danach wurde der Druck auf rd. 1 Pa abgesenkt, um die Prüfwand beobachten zu können.

Für die Durchführung der Prüfung wurden im übrigen die Bestimmungen von DIN 4102 Teil 2 (9/1977) eingehalten.

Bild 17: Zusammenstellung der Kennwerte vergleichbarer Wände

Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Zeile	Baustoff - Wand	Konstruktionsmerkmale MF = Mineralfaserplatten	Holzrippen aus Fichte mit $\rho = 480 \text{ kg/m}^3$ b_1/d_1 σ_{D1}		Beklankung aus Spanplatten mit $\rho = 620 \text{ kg/m}^3$ d_2	Dämmschicht gemäß DIN 4102 Teil 4 Abschnitt 4.11.5 D ρ		Fremdbrandlast (Ülverbrauch)	Abbrandgeschwindigkeit	Beflammung	Feuerwiderstandsdauer
-	-	mm	mm/mm	N/mm ²	mm	mm	kg/m ³	l/min	mm/min	-	min
1	Beton-Vergleichswand		-	-	-	-	-	3,2 ¹⁾	-	1-seitig oder 2-seitig	≥ 60 ³⁾
2	Holz-Vergleichswand		40/80	2,5	2 x 16	80	30	1,4 ¹⁾	$\sim 0,85$	1-seitig	70 ²⁾
3	Probekörper						35	3,2	1,5		40
4	Holz-Vergleichswand		50/80	2,5	2 x 16	-	-	1,4 ¹⁾	$\sim 0,85$	2-seitig	49 ²⁾
5	Probekörper		$d_1 + 2 d_2 = 144$					3,2	1,5		28

1) Fremdbrandlast zur Erzeugung der ETK

2) Ermittelt nach [2]

3) Entsprechend den Randbedingungen nach DIN 4102 Teil 4

4.2.2 Prüfergebnisse

Die Brandraumtemperaturen lagen trotz der Fremdbrandlast $q_B = 3,2 \text{ l/min}$ und der zusätzlich eingebauten Prüfwand nach Abschnitt 4.3 überwiegend im zulässigen Toleranzbereich der ETK. Der Mittelwert aller Brandraumtemperaturmeßstellen lag nur unwesentlich höher als die ETK. Die Sicht im Brandraum war schlecht; eine Beobachtung der Prüfwand war nicht möglich. Um eine Beobachtung zu ermöglichen, wurde der vorgeschriebene Druck im Brandraum in der 28. Minute auf 1 Pa gesenkt. Die Temperaturen erreichten danach die Temperaturen der Hydrocarbonkurve, vgl. Bild 6.

Die Feuerwiderstandsdauer betrug 40 Minuten, wobei der Verlust der Tragfähigkeit und der Verlust des Raumabschlusses durch Überschreiten von $\text{zul}\Delta T = 140/180 \text{ K}$ mit anschließendem Durchbrand nahezu gleichzeitig auftraten. Die Abbrandgeschwindigkeit lag auch hier rd. 43 % höher als die entsprechende Abbrandgeschwindigkeit unter ETK-Bedingungen.

Die erzielte Feuerwiderstandsdauer der tragenden, raumabschließenden Holzwand lag damit um 30 min \sim 43 % niedriger als die Feuerwiderstandsdauer einer ETK-beflammten Holzwand mit 70 min \sim 100 %. Die Abnahme der Feuerwiderstandsdauer erreichte damit denselben Wert, wie er bei einer Holzstütze nach Abschnitt 4.1 ermittelt wurde.

Die in DIN 4102 Teil 4 (3/1981), Tabelle 48, Zeile 6, mit F 60 klassifizierte Wand erreichte bei der beschriebenen Fremdbrandlast damit nur die Feuerwiderstandsklasse F 30.

4.3 Prüfung einer tragenden, nichtraumabschließenden Holzwand

4.3.1 Probekörper und Prüfungsdurchführung

Zur Feststellung der Feuerwiderstandsdauer einer tragenden, nicht-raumabschließenden Holzwand in Abhängigkeit von der Fremdbrandlast (Ölverbrauch) wurde eine Wand aus Holztafeln der Feuerwiderstandsklasse F 30 gemäß DIN 4102 Teil 4 (3/1981), Tabelle 47, Zeile 1, mit $d_2 = 2 \times 16$ mm dicken Spanplatten ausgewählt, weil

- die Feuerwiderstandsdauer einer solchen Wand bekannt ist,
- die ausgewählte Konstruktion mit einer Beplankung von 2×16 mm der Konstruktion der raumabschließenden F 60-Wand (vgl. Abschnitt 4.2) weitgehend entspricht,
- derartige tragende F 30-Wände als zweiseitig beflammte Wände im Fertigteilbau häufig vorkommen und
- der Ölverbrauch für nichtraumabschließende Wände für Normversuche sowohl für Holzwände als auch für Stahlbetonwände vorliegt.

Die Kennwerte der untersuchten Wand sind in Bild 17 im Vergleich zu anderen Wänden wiedergegeben, vgl. Zeilen 4 - 5.

Der Probekörper mit den Abmessungen B/H = 1500/2700 und einer beidseitigen Beplankung aus jeweils 2×16 mm Spanplatten wurde in denselben Prüfstand eingebaut, wie er für die Prüfung der

raumabschließenden Wand nach Abschnitt 4.2 verwendet wurde. Der Probekörper wurde mittig in der Ofenlängsachse errichtet und mit einem von der raumabschließenden Prüfwand getrennten Pressensystem so belastet, daß die Holzrippen ohne Berücksichtigung der Beplankung eine Spannung von ebenfalls $\sigma_{D1} = 2,5 \text{ N/mm}^2$ aufwiesen.

Der Probekörper wurde zusammen mit der raumabschließenden Holzwand geprüft. Die Ölzufuhr betrug $q_B = 3,2 \text{ l/min}$. Wegen der übrigen Randbedingungen siehe Bild 17 und die entsprechenden Angaben in Abschnitt 4.2.1.

4.3.2 Prüfergebnisse

Die Brandraumtemperaturen sind in Abschnitt 4.2.2 behandelt. Die Feuerwiderstandsdauer (Zeit bis zum Verlust der Tragfähigkeit) betrug 28 Minuten, die Abbrandgeschwindigkeit lag rd. 43 % höher als die entsprechende unter ETK-Bedingungen.

In DIN 4102 Teil 4 (3/1981), Tabelle 47, Zeile 1, wird bestimmt, daß die Beplankung einer nichtraumabschließenden Wand aus Holztafeln mindestens 25 mm oder 2 x 16 mm betragen muß. Die in [2] für eine derartige Wand angegebene Feuerwiderstandsdauer mit $(38 \pm 4) \text{ min}$ bezieht sich auf die einlagige, 25 mm dicke Beplankung. Die entsprechende Feuerwiderstandszeit für Wände mit beidseitig 2 x 16 mm dicker Beplankung beträgt nach [2] $(49 \pm 10^4) \text{ min}$. Bezieht man die mit der angegebenen Fremdbrandlast erzielte Feuerwiderstandsdauer von 28 min auf diesen 49-Minuten-Wert, der auch in Bild 17 angegeben ist, dann ergibt sich wie in den Versuchen nach den Abschnitten 4.1 und 4.2 wieder ein Abfall von rd. 43 %.

5. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse aus Klein- und Großversuchen

Bauteile werden zur Feststellung ihrer Feuerwiderstandsdauer und -klasse nach DIN 4102 Teil 2, Ausgabe 1977, unabhängig von der Verwendung brennbarer oder nichtbrennbarer Baustoffe einer Tempe-

raturzeitbeanspruchung entsprechend der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK) unterzogen. Bauteile aus brennbaren Baustoffen werden hinsichtlich der im Prüfofen zugeführten Fremdbrandlast aus Öl dabei geringer beansprucht als Bauteile aus nichtbrennbaren Baustoffen, da sich die Gesamtbrandlast zur Erzeugung der ETK aus der Fremdbrandlast aus Öl und der Eigenbrandlast der brennbaren Baustoffe zusammensetzt:

$$q_{\text{gesamt}} = \text{Fremdbrandlast} + \text{Eigenbrandlast.}$$

Geht man im Widerspruch zur bestehenden Prüfnorm mit ihrem nur temperaturabhängig definierten ETK-Brand vor und beansprucht ein Bauteil aus brennbaren Baustoffen mit einer bestimmten Fremdbrandlast, so kann sich bei derartigen Bauteilen eine Feuerwiderstandsdauer und -klasse ergeben, die wesentlich kleiner ist als die unter Normbedingungen (ETK) festgestellte. Wählt man bei der Prüfung von Holzbauteilen z.B. eine Fremdbrandlast in der Größe, wie sie zur Erzeugung der ETK bei der Prüfung von Stahlbetonbauteilen aus Normalbeton erforderlich ist, dann erhält man infolge der Eigenbrandlast

- i.a. eine Temperaturzeitbeanspruchung $>$ ETK,
- eine größere Abbrandgeschwindigkeit und daraus folgend
- eine kleinere Feuerwiderstandsdauer und ggf. auch -klasse.

Um den Einfluß der Brandlast auf das Brandverhalten - insbesondere auf die Abbrandgeschwindigkeit - von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen studieren zu können, wurden 13 Kleinversuche unter Verwendung von Spanplatten, Holzbohlen und Holzbalken sowie 3 Großversuche in Anlehnung an DIN 4102 Teil 2 mit einer Holzstütze, einer raumabschließenden und einer nichtraumabschließenden Holzwand unter Verwendung einer Fremdbrandlast q_B durchgeführt, die notwendig ist, um bei der Prüfung von entsprechenden Betonbauteilen die ETK zu erzeugen.

Mit den Kleinversuchen wurde festgestellt, daß die Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen u.a. von folgenden Einflußgrößen abhängt:

- Größe des Brandraumes,
- Lage der Ölbrenner zu den Meßquerschnitten für Bauteiltemperaturen und Abbrandtiefe,
- Größe der Fremdbrandlast (Ölzufuhr),
- Größe der Eigenbrandlast und
- Höhe des Sauerstoffgehaltes der Verbrennungsluft.

Es wurde u.a. festgestellt, daß die Abbrandgeschwindigkeit unbelasteter Holzbalken - d.h. von Balken ohne Verformungseinfluß - bei verschiedenen Fremdbrandlasten jeweils um rd. 43 % kleiner ist als die Abbrandgeschwindigkeit entsprechender Balken, die durch dieselben Fremdbrandlasten und zusätzlich durch eine Eigenbrandlast aus Wand-, Decken- und Bodenbekleidung aus Spanplatten (S) und Holzbohlen (Bo) beansprucht werden.

Bei den Großversuchen wurde dieselbe Relation auch ohne Anordnung zusätzlicher Eigenbrandlasten festgestellt, so daß gefolgert wird, daß die Ergebnisse der Kleinversuche sinngemäß auch auf die Großversuche übertragen werden können.

Die Zusammenfassung der wichtigsten Prüfergebnisse enthält Bild 18.

Bild 18: Zusammenfassung der wichtigsten Prüfergebnisse aus Groß- und Kleinversuchen

Spalte	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Zeile	Versuchsart	Nr. bzw. Abschnitt	Bauteil	Fremdbrandlast B = Betonbauteil H = Holzbauteil		Eigenbrandlast B = Holzbalken St = Holzstütze W = Holzwand Bo = Holzbohlen S = Spanplatten	Brandraumtemperaturen 2)	Abbrandgeschwindigkeit 8		Feuerwiderstandsdauer	
-	-	-	-	-	l/min	-	-	mm/min	%	min	%
1	Kleinversuche	3	Betondecke 1)	$q_B = q_{1,3}$	0,4	0	ETK	-	-	-	-
2		4-5	Betondecke 1)	q_2	2,0	0	Hdc	-	-	-	-
3		11	Holzbalken	$q_{1,3}$	0,4	B	ETK	0,6	57 4)	-	-
4		12	Holzbalken	$q_{1,3}$	0,4	B + Bo + S	> ETK	1,05	100.	-	-
5		(9-13) 7)	Holzbalken	q_2	2,0	B + Bo + S	≥ Hdc	1,4 3)	133	-	-
6	Großversuche	4.1	Holzstütze	q_H	6,0	St	ETK	0,7	57 4)	87	100
7		4.1	Holzstütze	q_B	7,1	St	> ETK	1,2	100	50	57 4)
8		4.2	Holzwand W 1 5)	q_H	1,4	W 1	ETK	0,85	57 4)	70	100
9		4.2	Holzwand W 1 5)	q_B	3,2	W 1 + W 2	> ETK	1,5	100	40	57 4)
10		4.3	Holzwand W 2 6)	q_H	1,4	W 2	ETK	0,85	57 4)	49	100
11		4.3	Holzwand W 2 6)	q_B	3,2	W 2 + W 1	> ETK	1,5	100	28	57 4)

1) Brandraumabdeckung aus Gasbetonplatten.

2) ETK = Einheitstemperaturzeitkurve, Hdc = Hydrocarbontemperaturzeitkurve, vgl. Bild 6.

3) Nach Bild 14 extrapolierter Wert.

4) Abfall gegenüber 100 % jeweils 43 %.

5) Raumabschließende Wand - Beflammung 1-seitig.

6) Nichtraumabschließende Wand - Beflammung 2-seitig.

7) Die in Zeile 5 angegebenen Werte wurden aus den Versuchen 9 - 13 abgeleitet.

6 Vergleich der Ergebnisse mit klassifizierten Bauteilen nach DIN 4102 Teil 4

Wie bereits in Abschnitt 1 ausgeführt, liegen den in DIN 4102 Teil 4 (3/1981) klassifizierten Holzbauteilen entsprechend den Prüfergebnissen von Normprüfungen (ETK) bestimmte Abbrandgeschwindigkeiten zugrunde [2,4]. Sie liegen bei Bauteilen mit geringer Verformung bei $0,65 \text{ mm/min} \leq \beta \leq 0,8 \text{ mm/min}$ und bei Bauteilen mit großer Verformung (Unterseite von Balken und Decken- bzw. Dachschalungen) bei $\beta = 1,1 \text{ mm/min}$, vgl. Bild 1.

Geht man von den beschriebenen brandlastgesteuerten Prüfungen aus, dann liegt die Abbrandgeschwindigkeit im Größenbereich $0,6 \text{ mm/min} \leq \beta \leq 1,5 \text{ mm/min}$ entsprechend $\beta_{0,20}$, gemäß Abschnitt 3.4.4. Bei Bauteilen mit mehrschaligem Aufbau - z.B. bei Verwendung mehrlagig angebrachter Spanplatten oder bei Schrankwänden [1] - ergeben sich noch größere Abbrandgeschwindigkeiten; sie liegen im Bereich $1,2 \text{ mm/min} \leq \beta \leq 2,0 \text{ mm/min}$, vgl. $\beta_{20,30}$ in Bild 13.

Ein Vergleich der Abbrandgeschwindigkeiten $\beta_{0,20}$, der durchgeführten Kleinversuche mit der bei Holzstützen üblichen Abbrandgeschwindigkeit entsprechend DIN 4102, Teile 2 und 4, geht aus Bild 19 hervor, das die Abbrandtiefen in Abhängigkeit von der Branddauer wiedergibt.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Abbrandgeschwindigkeiten auf die Feuerwiderstandsdauer von Holzbalken und -stützen, die nach DIN 4102 Teil 4 klassifiziert sind, sind in den Bildern 20 und 21 wiedergegeben. Auf die Wiedergabe entsprechender Bilder für andere Bauteile wie Wände, Decken, Dächer, Zugglieder usw., die ähnlich zu beurteilen sind, muß an dieser Stelle verzichtet werden.

In Bild 20 ist die Feuerwiderstandsdauer von brett-schichtverleimten Holzbalken aus Fichtenholz bei 3- und 4-seitiger Brandbeanspruchung für ein Seitenverhältnis $h/b = 2$ und eine Biege-

spannung von $\sigma_b = 11 \text{ N/mm}^2$ dargestellt. Die jeweils obere Gerade entspricht den Geraden der Bilder E.74 und E.75 aus [2] bei entsprechenden Randbedingungen; sie ergibt bei 30, 60 und 90 min die jeweiligen Mindestbreiten von Holzbalken aus Brettschichtholz für F 30, F 60 und F 90, wie sie in DIN 4102 Teil 4 (3/1981), Tabelle 62, und [2] angegeben sind. Diesen "Normgeraden" liegen entsprechend Bild 1 folgende Abbrandgeschwindigkeiten zugrunde:

Untere Seite : $\beta_u = 1,1 \text{ mm/min}$,
Übrige Seiten: $\beta_s = 0,8 \text{ mm/min}$.

Um den Rechenaufwand klein zu halten, wurden die übrigen jeweils darunter liegenden Geraden entsprechend den $\beta_{0,20}$ -Werten von Bild 14 mit einer Abbrandgeschwindigkeit von $1,2 \text{ mm/min} \leq (\beta_u = \beta_s) \leq 1,8 \text{ mm/min}$ ermittelt.

In Bild 21 ist die Feuerwiderstandsdauer von brett-schicht-verleimten, quadratischen Stützen aus Fichtenholz mit den Stoffwerten $E = 11\,000 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_{\parallel} = 46 \text{ N/mm}^2$ bei 4-seitiger Brandbeanspruchung für eine Knickspannung $\sigma_{\omega} = 11 \text{ N/mm}^2$ angegeben. Als weitere Randbedingungen gelten: Euler-Fall 3 und $s = 3,0 \text{ m}$. Die obere Gerade entspricht der Geraden von Bild E.101 aus [2] bei entsprechenden Randbedingungen; sie ergibt bei 30, 60 und 90 min die jeweiligen Mindestdicken von Holzstützen aus Brettschichtholz für F 30, F 60 und F 90, wie sie in DIN 4102 Teil 4 (3/1981), Tabellen 66 und 67, sowie [2] angegeben sind. Dieser "Normgeraden" eines vereinfachten Traglastdiagramms liegt die Abbrandgeschwindigkeit $\beta = 0,7 \text{ mm/min}$ zugrunde, vgl. Bild 1.

Die übrigen darunter liegenden Geraden wurden systematisch für eine Abbrandgeschwindigkeit $0,8 \text{ mm/min} \leq \beta \leq 1,5 \text{ mm/min}$ ermittelt. Bei der Geraden mit $\beta = 1,2 \text{ mm/min}$ ist gegenüber der obersten "Normgeraden" mit $\beta = 0,7 \text{ mm/min}$ der schon beschriebene Abfall der Feuerwiderstandsdauer von 100 % auf jeweils 57 % ablesbar, vgl. Bild 18.

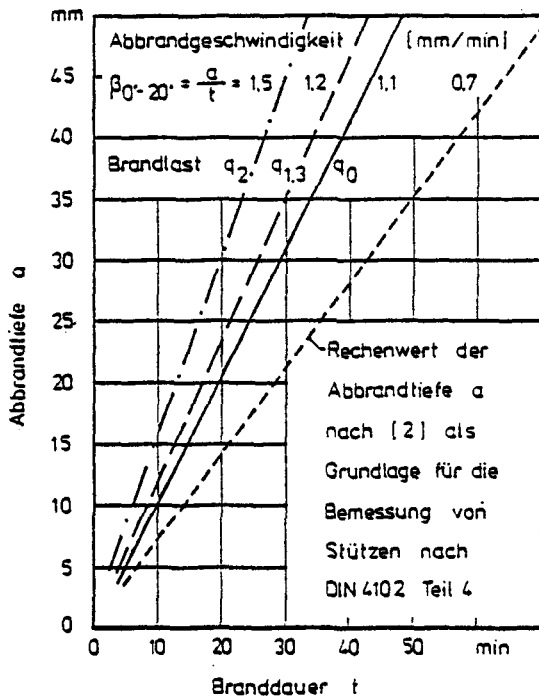


Bild 19:

Abbrandgeschwindigkeit β und Fremdbrandlasten $q_0, q_{1,3}$ und q_2 in Relation zur Abbrandtiefe a als Funktion der Branddauer t

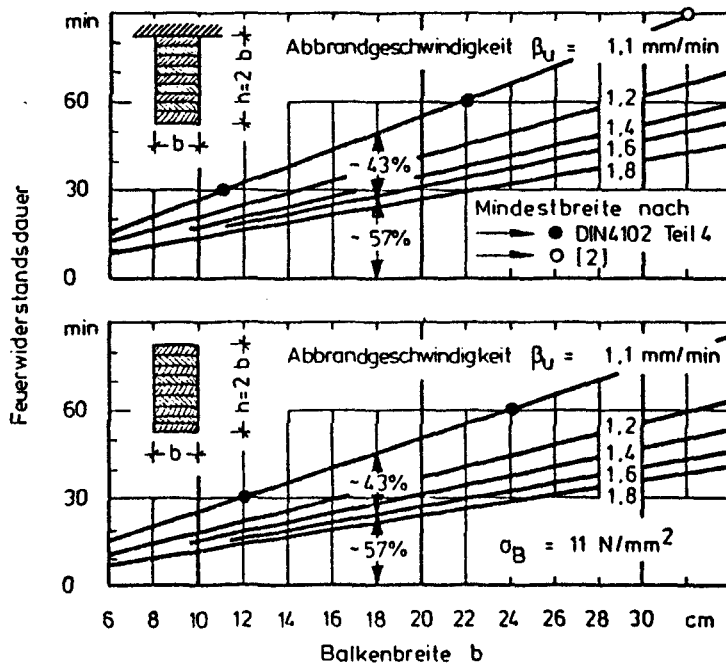


Bild 20:

Feuerwiderstandsdauer von bretttschichtverleimten Holzbalken aus Fichtenholz mit $h/b = 2$ bei einer Biegespannung $\sigma_B = 11$ N/mm² in Abhängigkeit von der Balkenbreite b und der Abbrandgeschwindigkeit β

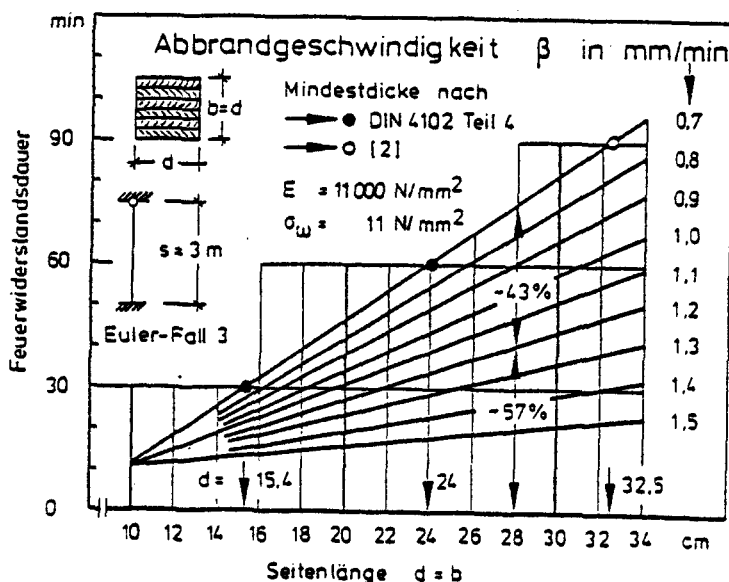


Bild 21:

Feuerwiderstandsdauer von bretttschichtverleimten Holzstützen aus Fichtenholz in Abhängigkeit von der Stützendicke d und der Abbrandgeschwindigkeit β

7 Vergleich der Ergebnisse mit natürlichen Bränden

Wie aus Abschnitt 1 hervorgeht, ist die Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen bei natürlichen Bränden u.a. abhängig von

- der Brandlast q (MJ) bzw.
- der auf die Gesamtfläche des Brandraumes A_t bezogenen Brandlast q_t (MJ/m²) und
- dem Öffnungsfaktor $F = A\sqrt{h}/A_t$ mit
- A = Gesamtfläche aller Öffnungen in Wänden (m²),
- A_t = Gesamtfläche des Brandraumes einschließlich aller Öffnungen (m²) und
- h = gewertete mittlere Höhe aller Wandöffnungen (m).

Nach Sven Hadvig [3] liegt die Abbrandgeschwindigkeit für übliche Öffnungsfaktoren von

$\sim 0,02 \text{ m}^{1/2}$ für minimal belüftete Räume bis

$\sim 0,30 \text{ m}^{1/2}$ für maximal belüftete Räume

bei beweglichen Brandlasten q_t - d.h. bei Fremdbrandlasten - von

< 200 MJ/m² (übliche Brandlast in Wohngebäuden),

$\sim (200 \text{ bis } 700) \text{ MJ/m}^2$ (höhere Brandlast, z.T. auch in Wohngebäuden),

> 700 MJ/m² (große Brandlast) bis

> 3000 MJ/m² (sehr große Brandlast, z.B. in Lagergebäuden)

zwischen 0,4 mm/min und 1,8 mm/min. Dabei wurde der Einfluß einer Eigenbrandlast nicht genauer untersucht - d.h.: Die in den Bildern 2 bis 4 angegebenen Brandlasten sind Gesamtbrandlasten q_t ohne Differenzierung in Fremd- und Eigenbrandlasten. Die Ergebnisse nach [2] zeigen deutlich, daß die Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen in natürlichen Bränden sehr viel größer als in ETK-gesteuerten "Normbränden" sein kann. Die Geraden in Bild 4 zeigen weiter, daß u.a. Holzstützen im Normbrand zu günstig beurteilt werden ($\beta_{\text{nat.Brand}} \gg \beta_{\text{ETK}} = 0,7 \text{ mm/min}$); sie sollen daher im folgenden weiter untersucht werden.

In probabilistischen Sicherheitsbetrachtungen ist der Sicherheitsindex β eine direkte Maßzahl zur Berechnung der Versagenswahr-

scheinlichkeit. Er wurde in umfangreichen Computerrechnungen für verschiedene Basisvariablen von Holzstützen (Festigkeit, E-Modul, Abbrand, Belastung usw.) in Abhängigkeit vom Öffnungsfaktor und der Gesamtbrandlast q_t für Verhältnisse des Wohnungsbaus ermittelt [6]. Dabei wurden Stützen mit bestimmten Eckwerten d , b und σ für 30 min und 60 min Feuerwiderstandsdauer gemäß DIN 4102 Teil 4 (3/1981) untersucht. Als Vergleich sollen hier die Ergebnisse der in Bild 22 charakterisierten Stützen betrachtet werden. Der Sicherheitsindex β ist in Bild 23 als Funktion des Öffnungsfaktors F und der Gesamtbrandlast q_t dargestellt.

Bild 22: Mindestdicke quadratischer, brett-schichtverleimter Holzstützen aus Nadelholz mit $E = 11.000 \text{ N/mm}^2$ ($\sigma_{D||} = 42 \text{ N/mm}^2$) für eine Lagerung gemäß Euler-Fall 2 ($s_k = 1,0 \text{ s}$)

Feuerwiderstands- dauer gemäß ETK-Brand	Knicklänge = Stützenlänge $s_k = 1,0 \text{ s}$	Knickspannung gemäß DIN 1052 $\sigma_\omega = \frac{\omega \cdot N}{b \cdot d}$	Mindestdicke d gemäß DIN 4102 Teil 4 (3/81) 2)
min	m	N/mm ²	mm
30	2,0	11 1)	160
60	2,0	11 1)	240 3)

- 1) Max zul σ für Güteklasse I DIN 4074
- 2) Vgl. DIN 4102 Teil 4 (3/1981), Tabellen 66 und 67, jeweils Zeile 1
- 3) Dieser Mindestwert gilt auch für $s = 3,0 \text{ m}$ bei Lagerung nach Euler-Fall 3 oder 4, vgl. DIN 4102 Teil 4 (3/1981), Tabelle 67, Zeile 1.

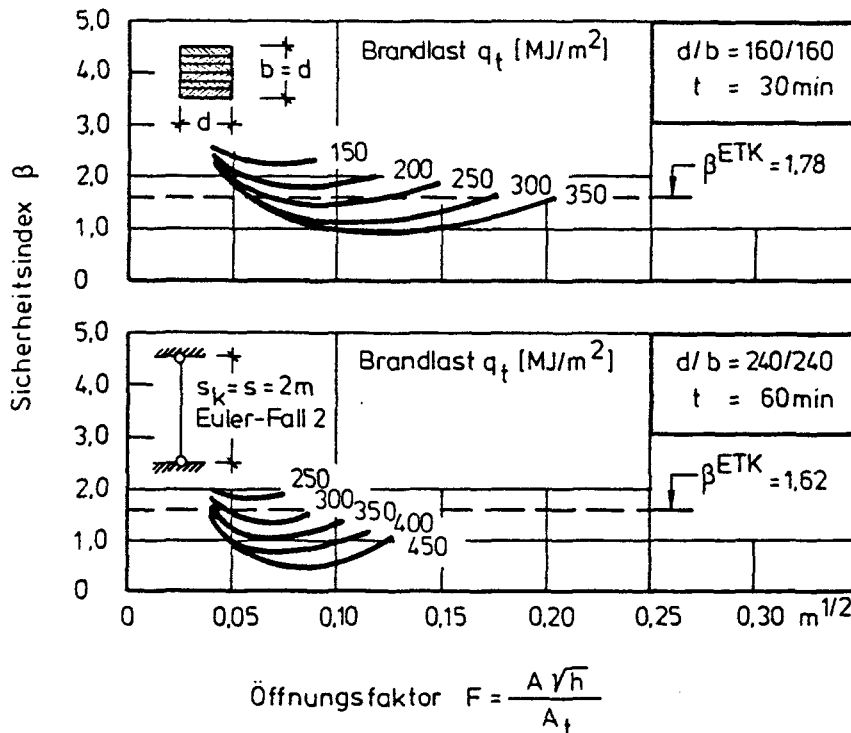


Bild 23:

Sicherheitsindex β von Holzstützen gem. Bild 22 als Funktion von Öffnungsfaktor F und Brandlast q_t bei natürlichen Bränden nach [6]

Die Darstellung in Bild 23 zeigt u.a. folgendes:

- Der Sicherheitsindex β^{ETK} der untersuchten Stützen liegt für ETK-Brände bei 1,78 (oberes Diagramm) und 1,62 (unteres Diagramm). Die geringfügigen Abweichungen zwischen den beiden Werten beruhen auf Rundungen und Vereinfachungen gemäß DIN 4102 Teil 4 und können hier vernachlässigt werden.
- Der Sicherheitsindex β bei natürlichen Bränden sinkt zunächst und steigt dann mit größer werdendem Öffnungsfaktor wieder an; die Ausgangswerte bei $0,04 \text{ m}^{1/2}$ werden jedoch nicht wieder erreicht.
- Der Sicherheitsindex β sinkt mit steigender Brandlast q_t . Ein Unterschreiten von β^{ETK} erfolgt bei $q_t > \text{rd. } 200 \text{ MJ/m}^2$ (oberes Diagramm) bzw. bei $q_t > \text{rd. } 270 \text{ MJ/m}^2$ (unteres Diagramm). Das Absinken des Sicherheitsniveaus ist beachtlich und mit den Ergebnissen der Abschnitte 3 - 5 vergleichbar.
- die β -Kurven enden jeweils auf der rechten Seite, weil die Rechnungen hier abgebrochen wurden und nur das Absinken des Sicherheitsindex deutlich gemacht werden sollte.

Betrachtet man einen Raum mit der Grundfläche $B \times L = 4 \text{ m} \times 4 \text{ m}$ und der Höhe $H = 3 \text{ m}$, dann beträgt die Gesamtfläche des Brandraumes $A_t = 80 \text{ m}^2$. Geht man von Wand-, Decken- und Fußboden-Beplankungen mit Spanplatten mit $d = 2 \times 16 \text{ mm}$ entsprechend der Abschnitte 4.2 und 4.3 aus, dann beträgt die Brandlast allein aus dieser Beplankung bzw. Bekleidung mit einer Rohdichte $\rho \geq 600 \text{ kg/m}^3$ und einem Heizwert $H_u = 4,8 \text{ kWh/kg} \approx 17,28 \text{ MJ/kg}$:
 $q = 80 \cdot 0,032 \cdot 600 \cdot 17,28 = 26.543 \text{ MJ}$. Bezogen auf die Flächen ergeben sich Brandlasten von

$$\begin{aligned} q_{\text{Grundfläche}} &= 1.659 \text{ MJ/m}^2 \text{ und} \\ q_t &= 332 \text{ MJ/m}^2. \end{aligned}$$

Ein Brandraum, z.B. ein Wohnraum mit Wohnungstrennwand nach Abschnitt 4.2 - d.h. mit einer Beplankung aus $2 \times 16 \text{ mm}$ dicken Spanplatten -, besitzt damit ohne Berücksichtigung der Holzunterkonstruktion aus Holzrippen, Holzbalken usw. bereits eine Eigenbrandlast, die ohne Berücksichtigung einer Fremdbrandlast zu einem Sicherheitsindex β führt, der erheblich unterhalb des Niveaus von β^{ETK} liegt, vgl. Bild 23, sowie die Kleinversuche mit q_0 in Abschnitt 3.

Geht man im vorstehenden Beispiel von einer Fremdbrandlast von 200 MJ/m^2 bis rd. 700 MJ/m^2 aus, die in einem Raum aus nichtbrennbaren Baustoffen die ETK erzeugt, dann sinkt das Sicherheitsniveau in diesem Fall noch stärker; bei $q = 332 + 300$ (Mittelwert) $= 632 \text{ MJ/m}^2$ liegt der β -Wert bereits weit unterhalb der in Bild 23 jeweils angegebenen untersten Kurve.

Das Beispiel mit einer Beplankung mit $2 \times 16 \text{ mm}$ dicken Spanplatten für die Klassifizierung F 60 ist sicherlich extrem - die Relationen bei dünnerer 1-lagiger Beplankung bleiben jedoch erhalten. Bei einer praxisüblichen Beplankung bzw. Bekleidung von nur $1 \times 16 \text{ mm}$ dicken Spanplatten für die Klassifizierung F 30 sinkt q_t auf die Hälfte; der Sicherheitsindex β sinkt nahezu auf den β^{ETK} -Wert ab, vgl. Bild 23, oberes Diagramm. Ein Vorhaltemaß, zur Berücksichtigung der Eigenbrandlast, wäre hier bereits aufgezehrt. Die Fremdbrandlast - z.B. aus Mobiliar - führt dann allein zu einem beachtlichen Absinken unter das Sicherheitsniveau $\beta^{\text{ETK}} = 1,78$ im vor-

liegenden Beispiel. Eine Halbierung des Sicherheitsindex kann in diesem Beispiel einer Halbierung der Feuerwiderstandsdauer annähernd gleichgesetzt werden, vgl. auch mit den Ergebnissen in Abschnitt 5, Bild 18.

Die vorstehenden Beispiele gelten für Räume bzw. Gebäude mit relativ kleinen Brandlasten, z.B. für Wohngebäude. Bei Räumen bzw. Gebäuden mit anderer Nutzung - z.B. bei Lagerräumen mit sehr großen Fremdbrandlasten - liegen i.a. wesentlich ungünstigere Verhältnisse vor.

Abschließend sei erwähnt, daß die Werte von Bild 23 exakt nur für Stützen mit $s_k = 1,0$ $s = 2$ m gelten - die vergleichenden Betrachtungen jedoch mit einer Raumhöhe von 3 m durchgeführt wurden. Die Werte können sinngemäß aber auch auf Stützen mit $s = 3$ m übertragen werden, vgl. Fußnote 3) in Bild 22.

8 Vergleich der Ergebnisse mit Brandlasten nach DIN 4102 Teil 2

Wie aus den Abschnitten 3 bis 5 hervorgeht, ist die Fremdbrandlast, die zur Erzeugung der ETK notwendig ist, von verschiedenen Einflußgrößen abhängig, u.a. von der Größe und Art des Brandraumes sowie von der Eigenbrandlast des Prüfkörpers. Jeder Ofenprüfstand hat dabei seine eigene Charakteristik. Bei jeder Normprüfung wird eine andere Fremdbrandlast verwendet. Auch wenn die Temperatur, der Druck und der Sauerstoffgehalt im Prüfofen sowie das Ofenmauerwerk genormt sind, ergeben die Prüfungen bei einem Prüfkörper in Wiederholungsversuchen Streuungen, die noch nicht systematisch untersucht wurden.

Zum Vergleich der Ergebnisse der Abschnitte 3 bis 5 mit Brandlasten nach DIN 4102 Teil 2 stehen u.a. die in Espoo (Finnland) und Braunschweig festgestellten Werte zur Verfügung, vgl. Bilder 24 und 25.

Bild 24: Notwendige Fremdbrandlast in Form von leichtem Heizöl EL bzw. Dieselkraftstoff entsprechend DIN 4102 Teil 2 zur Erzeugung der ETK in Wandprüföfen in Espoo (Finnland) und Braunschweig

Spalte	1	2	3	4	5	6	7
Zeile	Prüf-anstalt	Baustoff	Fremdbrandlast = Heizöl EL oder Dieselkraftstoff (Heizwert $H_u \sim 42 \text{ MJ/kg}$)				
			min		Mittel		max
			MJ/min	$\ell/\text{min } 2)$	MJ/min	%	MJ/min
1	Espoo	Nichtbrennbar ¹⁾	79,7	-	107,5	100	136,7
2		Holz und/oder Holzwerkstoffe	48,2	-	70,7	65	91,9
3	Braun-schweig	Normalbeton		3,2	114	100	
4		Kalksandstein		2,7	96	84	
5		Ziegel		2,5	89	78	
6		Gasbeton		2,4	86	75	
7		Holz und/oder Holzwerkstoffe	45	1,4	50	44	54

- 1) Beton, Mauerwerk, Stahl (ohne brennbare Bekleidungen) u.ä.
 2) Rohdichte von Heizöl EL $\rho \sim 0,85 \text{ kg/l}$

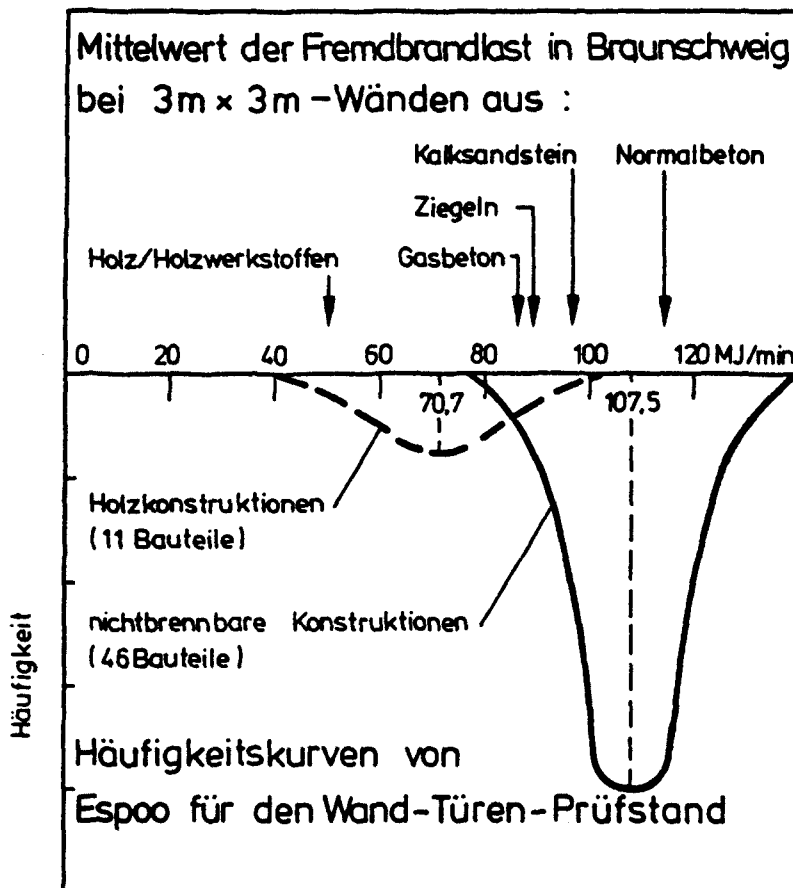


Bild 25:

Vergleich der Zahlenwerte von Bild 24 in einem Häufigkeitsdiagramm
 Fremdbrandlast = Brennstoffzufuhr in MJ/min

Bild 24 zeigt eine Zusammenstellung von Zahlenwerten, die bei Prüfungen in verschiedenen Wandprüföfen festgestellt wurden. Bild 25 zeigt die finnischen Werte als Häufigkeitskurven [7]. Dabei wurden 46 Bauteile aus nichtbrennbaren Baustoffen und 11 Bauteile aus brennbaren Baustoffen erfaßt. Zu den Bauteilen aus nichtbrennbaren Baustoffen gehören Wände aus Beton, Mauerwerk und Stahl, wobei Angaben über die Rohdichte, Temperaturleitzahl, Feuchte usw. der Baustoffe fehlen. Der Häufigkeitsverteilung sind die Mittelwerte von Wandprüfungen in Braunschweig gegenübergestellt. Der Vergleich zeigt eine relativ gute Übereinstimmung.

Im Gegensatz zu den nichtbrennbaren Baustoffen liegen bei den brennbaren Baustoffen nach [7] nur 11 Prüfungen mit Brandlasterhebungen vor. Unter dem Begriff Holzkonstruktionen werden nicht nur Wände - überwiegend aus Holz -, sondern auch Türen aus Holz und Holzwerkstoffen erfaßt, die im Vergleich zu einer Wand mit $B/H = 3 \text{ m}/3 \text{ m}$ relativ klein sind, i.a. nämlich $B/H = 1 \text{ m}/2 \text{ m}$. Der Anteil der Eigenbrandlast ist hier naturgemäß kleiner, da das umgebende Bauteil i.a. aus Mauerwerk besteht; der Fremdbrandlastanteil ist daher zwangsläufig größer. Der flach verlaufenden Häufigkeitsverteilung mit gleicher Gesamtstreibbreite wie bei den Wänden aus nichtbrennbaren Baustoffen sind die Fremdbrandlasten von Braunschweiger Wandprüfungen ($3 \text{ m}/3 \text{ m}$) aus Holz und Holzwerkstoffen - z.T. mit einer Dämmung aus Mineralfasern entsprechend Bild 17 - gegenübergestellt. Diese Werte liegen wegen der Unterschiede in den Grundgesamtheiten im unteren Fremdlastbereich der finnischen Verteilungskurve.

Der Vergleich der Fremdbrandlasten zeigt im übrigen, daß die Differenz zwischen Fremdbrandlast bei nichtbrennbaren Bauteilen und Fremdbrandlast bei brennbaren Bauteilen bei Normprüfungen mit der ETK im Extremfall noch rd. $35 \text{ MJ/min} \approx 1 \text{ l/min}$ größer sein kann, als sie in den Abschnitten 4 bis 5 beschrieben ist.

Für andere Prüfstände (Decken, Balken, Stützen usw.) liegen ähnliche Ergebnisse vor; sie sollen im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt werden.

9 Ausblick

Die in den Abschnitten 3 und 4 beschriebenen Brandversuche zur Untersuchung des Einflusses der Brandlast auf das Brandverhalten von Holzbauteilen und die daran anschließenden Vergleiche

- der Klein- und Großversuche in Abschnitt 5,
- der Ergebnisse mit klassifizierten Bauteilen nach DIN 4102 Teil 4 in Abschnitt 6,
- der Ergebnisse mit natürlichen Bränden in Abschnitt 7 und
- der Ergebnisse mit Brandlasten nach DIN 4102 Teil 2 in Abschnitt 8

zeigen deutlich, daß die Größe der Fremd- und Eigenbrandlast eine entscheidende Bedeutung hinsichtlich des Abbrandverhaltens - d.h. hinsichtlich der Abbrandgeschwindigkeit und der Feuerwiderstandsdauer - von Holzbauteilen besitzt. Der Einfluß von Fremd- und Eigenbrandlast ist so groß, daß es Zeit wird, die hier geschilderten Tatsachen offen zu diskutieren und ggf. das Prüf- und Beurteilungsverfahren zu ändern. Um zu einer gerechten oder gerechteren Beurteilung zu kommen, gibt es verschiedene Wege; einige sollen hier stichwortartig angedeutet werden:

1. Die Erhöhung des Risikos - d.h. der Abfall des Sicherheitsniveaus (Sicherheitsindex β , vgl. Bild 23) bei natürlichen Bränden gegenüber dem ETK-Brand nach Norm - wird nicht mehr toleriert. Ebenso wird - gleichbedeutend mit dem Abfall der Feuerwiderstandsdauer bei natürlichen Bränden - die Verwendung kleinerer Fremdbrandlasten bei der Normprüfung (ETK) von Holzbauteilen im Vergleich zu Bauteilen aus nichtbrennbaren Baustoffen nicht mehr hingenommen. Eine derartige Denkweise kann z.B. zu folgenden Konsequenzen führen:

1.1 Das bisher verwendete Normverfahren mit ETK-gesteuertem Brand wird durch ein neues, noch zu normendes Verfahren mit brandlast-gesteuertem Brand ersetzt. Die Brandlast (Fremdbrandlast) müßte festgelegt werden.

1.2 Das bisher verwendete Prüfverfahren wird beibehalten - die Beurteilung wird jedoch modifiziert. Dies könnte z.B. durch einen Bonus-Malus-Faktor erfolgen, wobei Holzbauteilen ein Malusfaktor bzw. differenzierte Malusfaktoren zugeordnet werden.

1.3 Das bisher verwendete Prüfverfahren wird beibehalten. Die abschließende Beurteilung der Brandsituation wird nicht im Normverfahren, sondern bei den bauaufsichtlichen Anforderungen berücksichtigt - d.h. die Verwendung brennbarer Baustoffe wird neu geregelt, z.B. durch

- a) die Schaffung neuer Richtlinien für die Verwendung brennbarer Baustoffe im Holzbau und gleichzeitig durch
- b) die Änderung der Landesbauordnungen bzw. Durchführungsverordnungen und Verwaltungsvorschriften.

Ein Weg der Eigenbrandlastminderung ist die Forderung von F...AB-Konstruktionen anstelle von F...B-Konstruktionen oder - wie z.B. in den Bauvorschriften der Länder NW und Hamburg teilweise schon geschehen - die Forderung nach einer abdeckenden Schicht aus nichtbrennbaren Baustoffen bei Wänden und Decken (→ F...B/A), vgl. auch [4].

2. Die mehrfach beschriebene Erhöhung des Risikos wird trotz der gravierenden Unterschiede toleriert. Bei dieser Denkweise sollte man das Risiko klar beschreiben, z.B. in den "Erläuterungen zur Norm". Diesem Risiko müßten alle an den Brandschutzvorschriften maßgebenden Beteiligten zustimmen. Das bei Holzkonstruktionen erhöhte Risiko muß bewußt getragen werden.

3. Zur Schaffung von einwandfreien, gerechten und einheitlichen Beurteilungsgrundlagen ist es dringend erforderlich, weitere Forschungsvorhaben durchzuführen, u.a. auf folgenden Gebieten:

- Schaffung von Grundlagen für die Festlegung von einheitlichen
 - in besonderen Fällen ggf. modifizierten - Sicherheitsindices β mit Hilfe probabilistischer Rechnungen, vgl. [6]. Bei der Modifizierung der β -Werte sind ggf. Vorhaltemaße (Teilwerte) zur Abdeckung von Eigenbrandlasten zu berücksichtigen.

- Überarbeitung aller Mindestwerte (Randbedingungen) von DIN 4102 Teil 4 auf der Basis der vorstehend angegebenen Sicherheitsindices β .
- Systematische Untersuchung aller Brandprüfstände hinsichtlich vergleichbarer Fremdbrandlasten sowie Darstellung der dazugehörigen Randbedingungen (Ofenmauerwerk, Ofengröße, Sauerstoffgehalt usw.).
- Durchführung von Wärmebilanzrechnungen zur Erfassung der Brandabläufe, so daß zwischen den verschiedenen Brandöfen hinsichtlich der Meßergebnisse inter- und extrapoliert werden kann.
- Schaffung von Vorschriften für den Bau und Betrieb von Versuchsofen mit dem Ziel, die Streubreite der Prüfbedingungen und Meßergebnisse zu verkleinern.

Es ist zu hoffen, daß zur Durchführung derartiger Forschungsvorhaben genügend Geldmittel zur Verfügung gestellt werden.

10 Literaturverzeichnis

- [1] Kordina, K. und Meyer-Ottens, C.: Über den Einfluß der Brandlast auf Brandraumtemperatur und Feuerwiderstandsdauer bei der Prüfung von Beton- und Holzwänden nach DIN 4102. Materialprüfung 11 (1969), Nr. 8.
- [2] Kordina, K. und Meyer-Ottens, C.: Holz Brandschutz Handbuch. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung. München 1983.
- [3] Hadvig, Sven: Charring of Wood in Building Fires. Technical University of Denmark, Laboratory of Heating and Air-Conditioning. Lyngby 1981.
- [4] Meyer-Ottens, C.: Baulicher Brandschutz nach neuem Bauaufsichtsrecht - Brandrisiken im Bereich von Baustoffen und Bauteilen.
 - a) Bundesbaublatt 1985, Heft 7.
 - b) VFDB-Zeitschrift 1985, Heft 3.
- [5] Revision of ISO 834-1975, Fire resistance tests - Elements of building construction, Fourth Draft.
ISO TC 92 / SC2 / WG 1 / N 236 (part 1+2), N 247 (part 3)
- [6] Kordina, K., Schneider, U., Henke, V. und Lubienetzki, K.-P.: Sicherheitsbetrachtung über die Normprüfung an tragenden Bauteilen im Wohnungsbau.
Abschlußbericht eines Forschungsvorhabens, durchgeführt am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig im Auftrage des Instituts für Bautechnik, Berlin. Braunschweig, November 1984.
- [7] Loikkanen, P.: Statistics about energy input to test furnaces of VTT in 1981 and 1982.
Doc. ISO TC 92 / SC2 / WG 1 / N 192, Espoo, Finnland, Februar 1983.

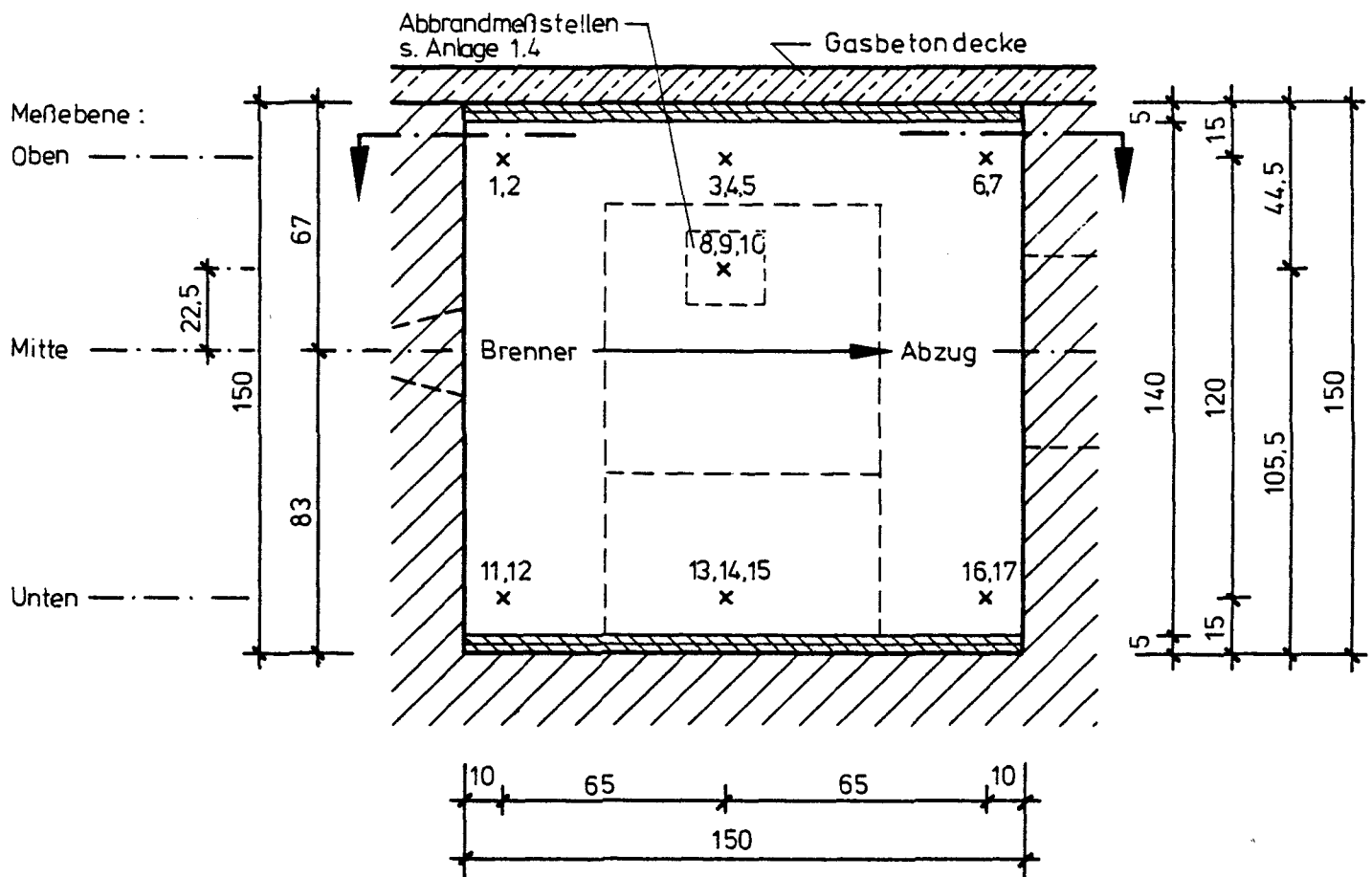
Anlagenübersicht: Kleinversuche

Anlage	Versuch	Brandlast, Erläuterung	Darstellung
1.1 1.2 1.3	1 - 10 11 12 - 13	- - -	Ofenschnitte und Lage der Brandraum- Temperaturmeßstellen
1.4 1.4 1.5 1.6	6 - 10 12 - 13 12 - 13 11 - 13	- - - -	Meßst. in den Spanplatten Meßst. in den Spanplatten Meßst. in den Holzbohlen Meßst. in den Holzbalken
2.1 2.2 2.3 2.4 2.5	1 2 3 4 5	$q_{1.1}$ $\varnothing 1$ $q_{1.2}$ $\varnothing 1$ $q_{1.3}$ $\varnothing 1$ q_2 $\varnothing 1$ q_2 $\varnothing 1$	Brandraum- Temperaturen
2.6 2.7 2.8 2.9 2.10	6 7 8 9 10	q_0 $\varnothing 1$ + Spanplatten q_0 $\varnothing 1$ + Spanplatten $q_{1.3}$ $\varnothing 1$ + Spanplatten q_2 $\varnothing 1$ + Spanplatten q_2 $\varnothing 1$ + Spanplatten	
2.11 2.12 2.13	11 12 13	$q_{1.3}$ $\varnothing 1$ + Balken $q_{1.3}$ $\varnothing 1$ + Balken + Spanpl./Holz q_0 $\varnothing 1$ + Balken + Spanpl./Holz	
3 4	1 - 13 6 - 10	$q_0, q_{1.3}, q_2$ $q_0, q_{1.3}, q_2$	
5.1.1 5.1.2 5.1.3	6 6 6	Meßst. 21 - 40 Meßst. 21 - 30 Meßst. 31 - 40	Spanplatten- Temperaturen
5.2.1 5.2.2 5.2.3	7 7 7	Meßst. 21 - 40 Meßst. 21 - 30 Meßst. 31 - 40	
5.3.1 5.3.2 5.3.3	8 8 8	Meßst. 21 - 40 Meßst. 21 - 30 Meßst. 31 - 40	
5.4.1 5.4.2 5.4.3	9 9 9	Meßst. 21 - 40 Meßst. 21 - 30 Meßst. 31 - 40	
5.5.1 5.5.2 5.5.3	10 10 10	Meßst. 21 - 40 Meßst. 21 - 30 Meßst. 31 - 40	

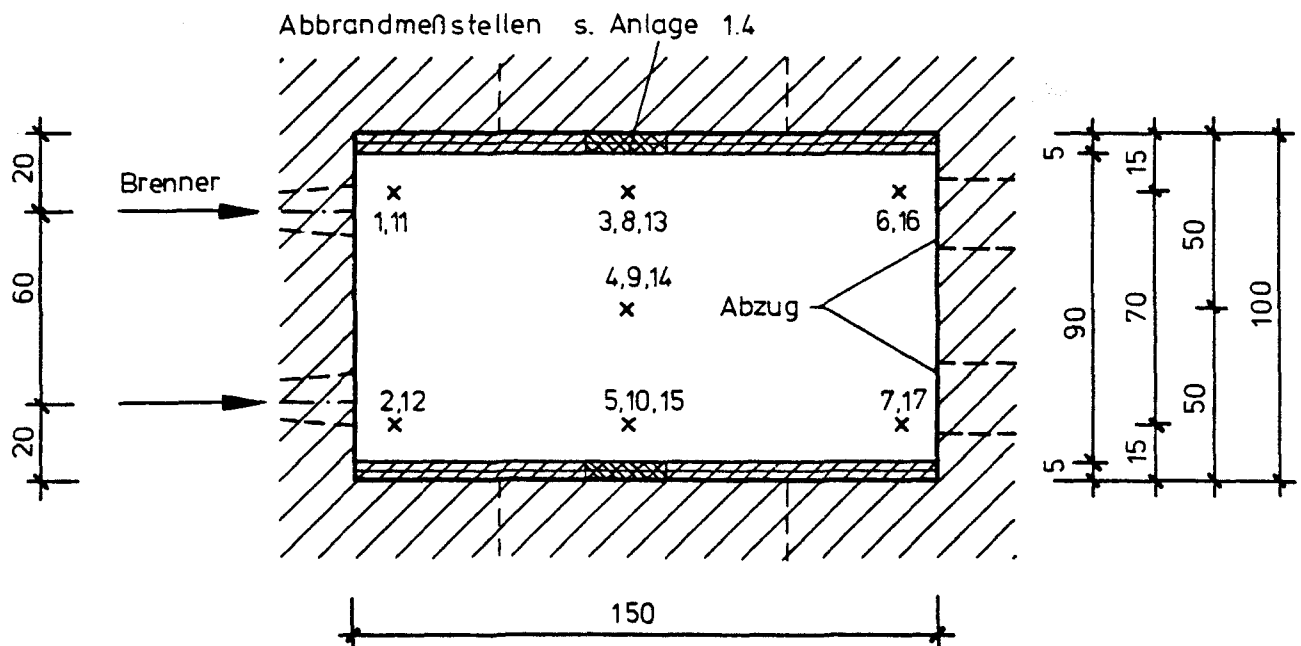
Anlagenübersicht: Kleinversuche (Fortsetzung)

Anlage	Versuch	Erläuterung	Darstellung
5.6.1	11	Meßst. 1 - 8 und 11 - 18	Balken- Temperaturen
5.6.2	11	Meßst. 1 - 8	
5.6.3	11	Meßst. 11 - 18	
5.6.4	11	Meßst. 1 - 8, 11 - 18 u. 21 - 28	
5.6.5	11	Meßst. 21 - 28	
5.7.1	12	Meßst. 1 - 8 und 11 - 18	
5.7.2	12	Meßst. 1 - 8	
5.7.3	12	Meßst. 11 - 18	
5.7.4	12	Meßst. 1 - 8, 11 - 18 und 21-28	
5.7.5	12	Meßst. 21 - 28	
5.8.1	13	Meßst. 1 - 8, 11 - 18 und 21-28	
5.8.2	13	Meßst. 1 - 8	
5.8.3	13	Meßst. 11 - 18	
5.8.4	13	Meßst. 21 - 28	
5.7.6	12	Meßst. 41 - 60	Holzbohlen + Spanpl.-Temp. Holzbohlen-Temperaturen Spanplatten-Temperaturen
5.7.7	12	Meßst. 41 - 50	
5.7.8	12	Meßst. 51 - 60	
5.8.5	13	Meßst. 41 - 60	Holzbohlen + Spanpl.-Temp. Holzbohlen-Temperaturen Spanplatten-Temperaturen
5.8.6	13	Meßst. 41 - 50	
5.8.7	13	Meßst. 51 - 60	
6.1	6	Auswertung d. Anl. 5.1.1 - 5.1.3	Abbrandtiefe a als $f(t)$; Bestimmung von β = Abbrandgeschwindigkeit
6.2	7	Auswertung d. Anl. 5.2.1 - 5.2.3	
6.3	8	Auswertung d. Anl. 5.3.1 - 5.3.3	
6.4	9	Auswertung d. Anl. 5.4.1 - 5.4.3	
6.5	10	Auswertung d. Anl. 5.5.1 - 5.5.3	
6.6	11	Auswertung d. Anl. 5.6.1 - 5.6.3	
6.7	11	Auswertung d. Anl. 5.6.4 - 5.6.5	
6.8	12	Auswertung d. Anl. 5.7.1 - 5.7.3	
6.9	12	Auswertung d. Anl. 5.7.4 - 5.7.5	
6.10	12	Auswertung d. Anl. 5.7.6 - 5.7.7	
6.11	12	Auswertung d. Anl. 5.7.6 - 5.7.8	
6.12	13	Auswertung d. Anl. 5.8.1 - 5.8.2	
6.13	13	Auswertung d. Anl. 5.8.1 - 5.8.4	
6.14	13	Auswertung d. Anl. 5.8.5 - 5.8.6	
6.15	13	Auswertung d. Anl. 5.8.5 - 5.8.7	

Vertikalschnitt des Ofens

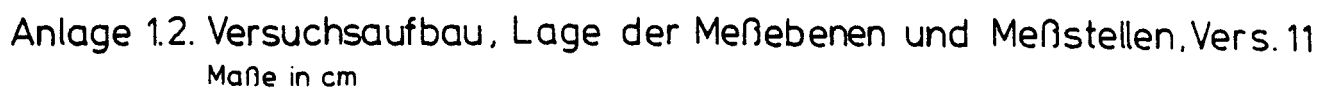


Horizontalschnitt des Ofens



Anlage 1.1 Versuchsaufbau, Lage der Meßebenen und Meßstellen, Vers. 1-10
Maße in cm

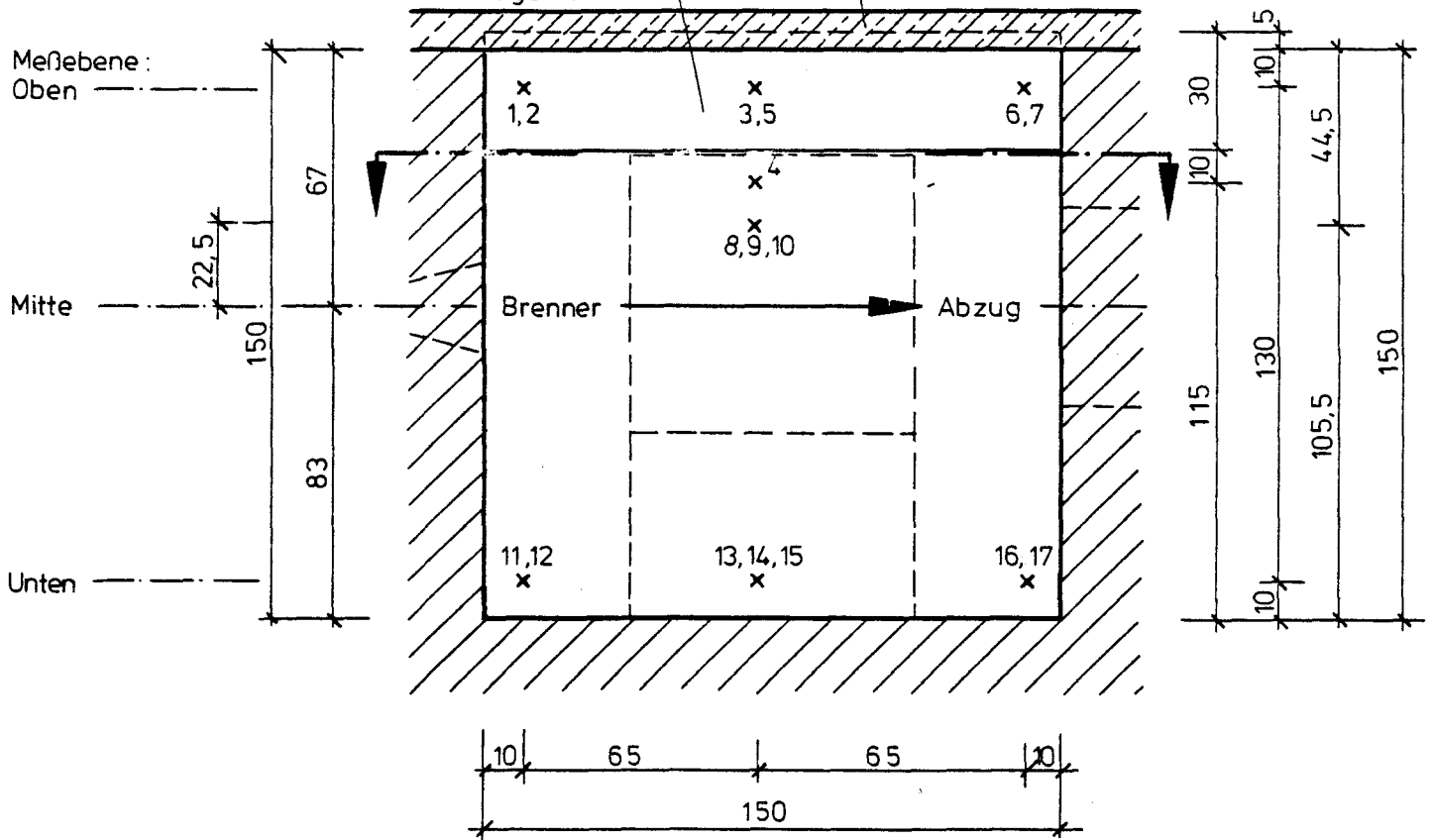
Balken aus Brettschichtholz 30/30,
Abbrandmeßstellen
s. Anlage 1.6



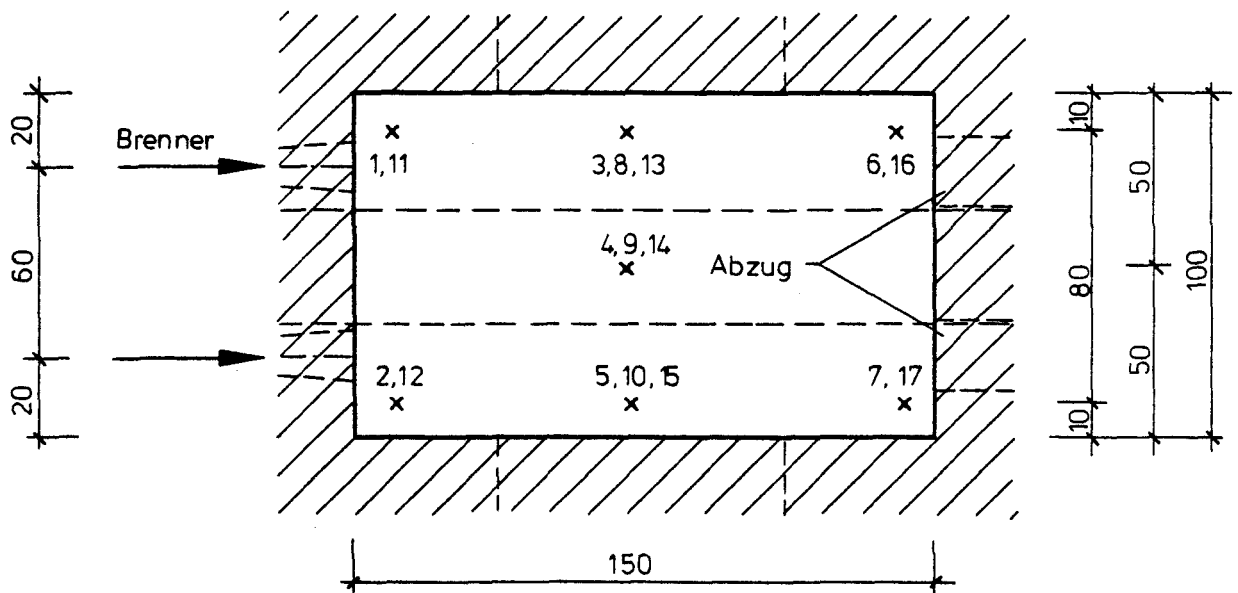
Vertikalschnitt des Ofens

Balken aus Brettschichtholz 30/30,
Abbrandmeßstellen
s. Anlage 1.6

Gasbetondecke



Horizontalschnitt des Ofens

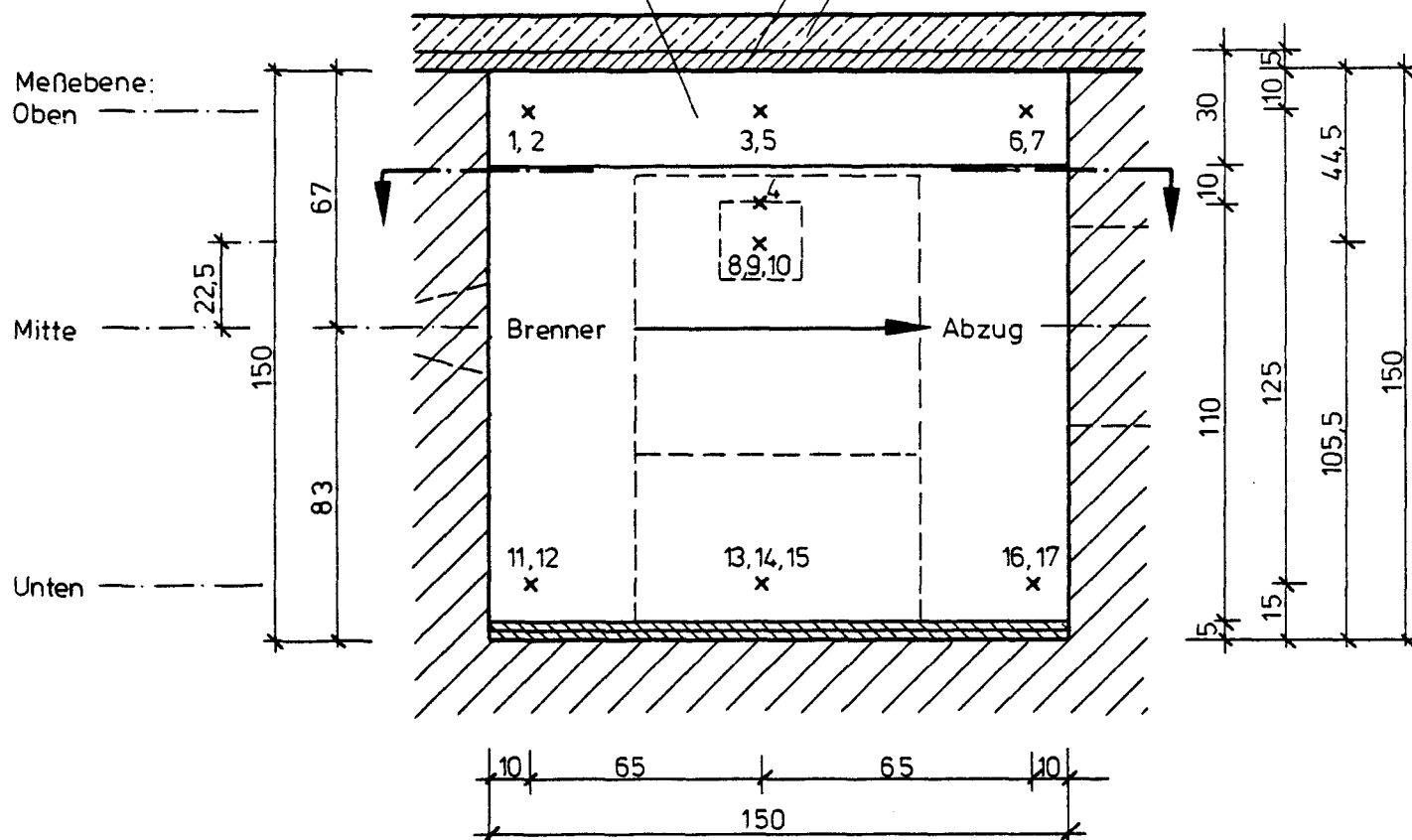


Anlage 1.2. Versuchsaufbau, Lage der Meßebenen und Meßstellen, Vers. 11
Maße in cm

Vertikalschnitt des Ofens

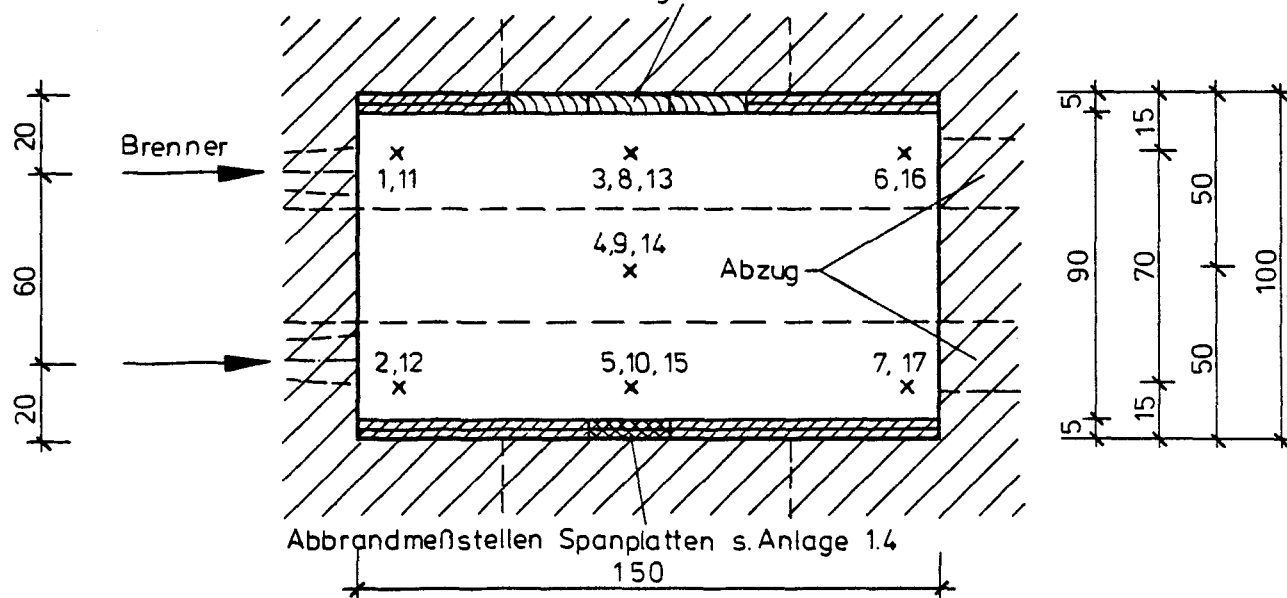
Balken aus Brettschichtholz 30/30,
Abbrandmeßstellen
s. Anlage 1.6

Holzbohlen
Gasbetondecke

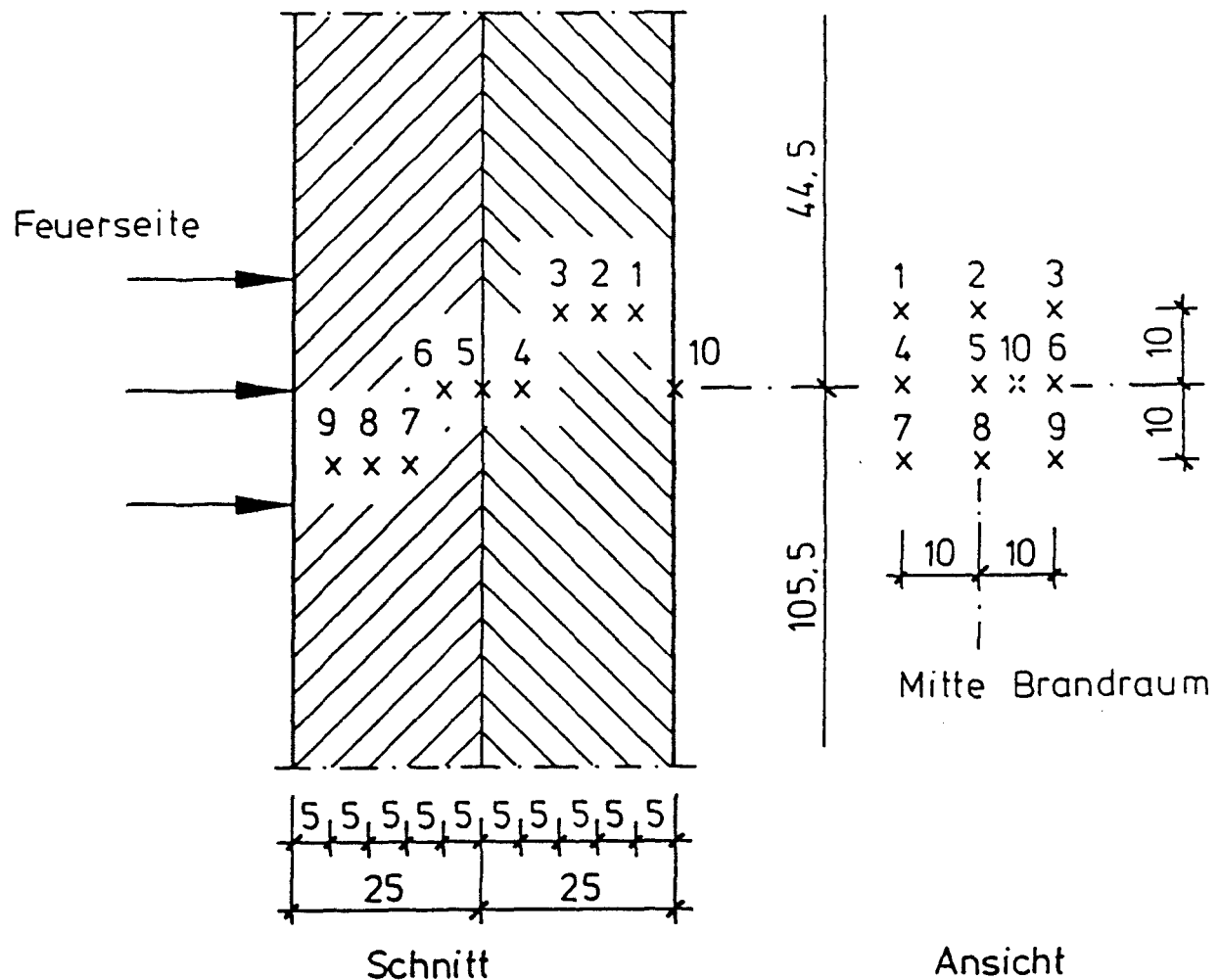


Horizontalschnitt des Ofens

Holzbohlen
Abbrandmeßstellen s. Anlage 1.5



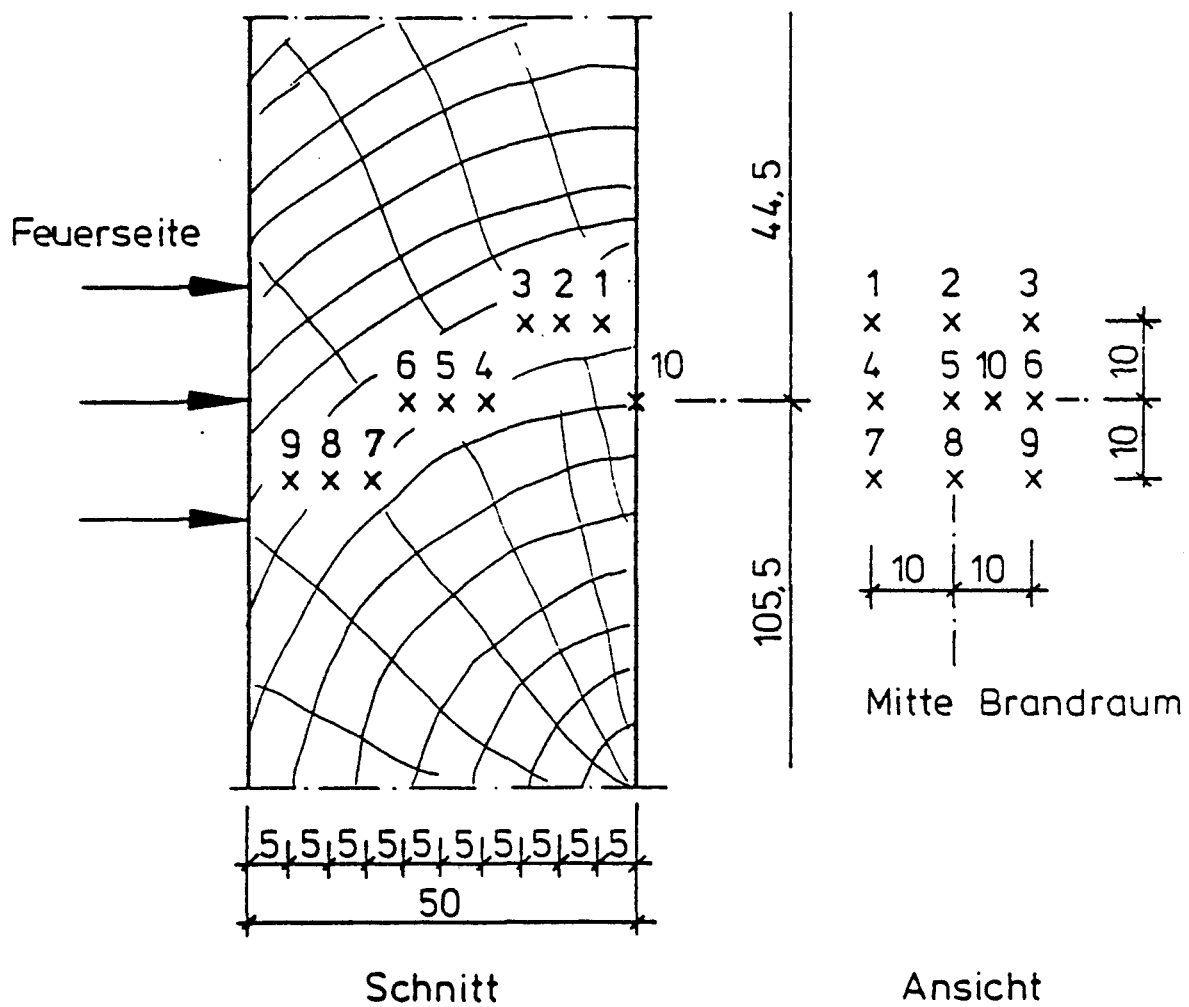
Anlage 1.3 Versuchsaufbau, Lage der Meßebenen und Meßstellen, Vers.12-13
Maße in cm



Anstelle der hier angegebenen Meßstellen-Nummern 1 - 10 gelten auch die Nummern 21 - 30 bzw. 31 - 40 bzw. 51 - 60, d.h.:

Meßstelle 1 ~ 21 (linke Seite) ~ 31 (rechte Seite) ~ 51 (rechte Seite)
 Meßstelle 2 ~ 22 (linke Seite) ~ 32 (rechte Seite) ~ 52 (rechte Seite)
 Meßstelle : ~ : : :
 Meßstelle 10 ~ 30 (linke Seite) ~ 40 (rechte Seite) ~ 60 (rechte Seite)

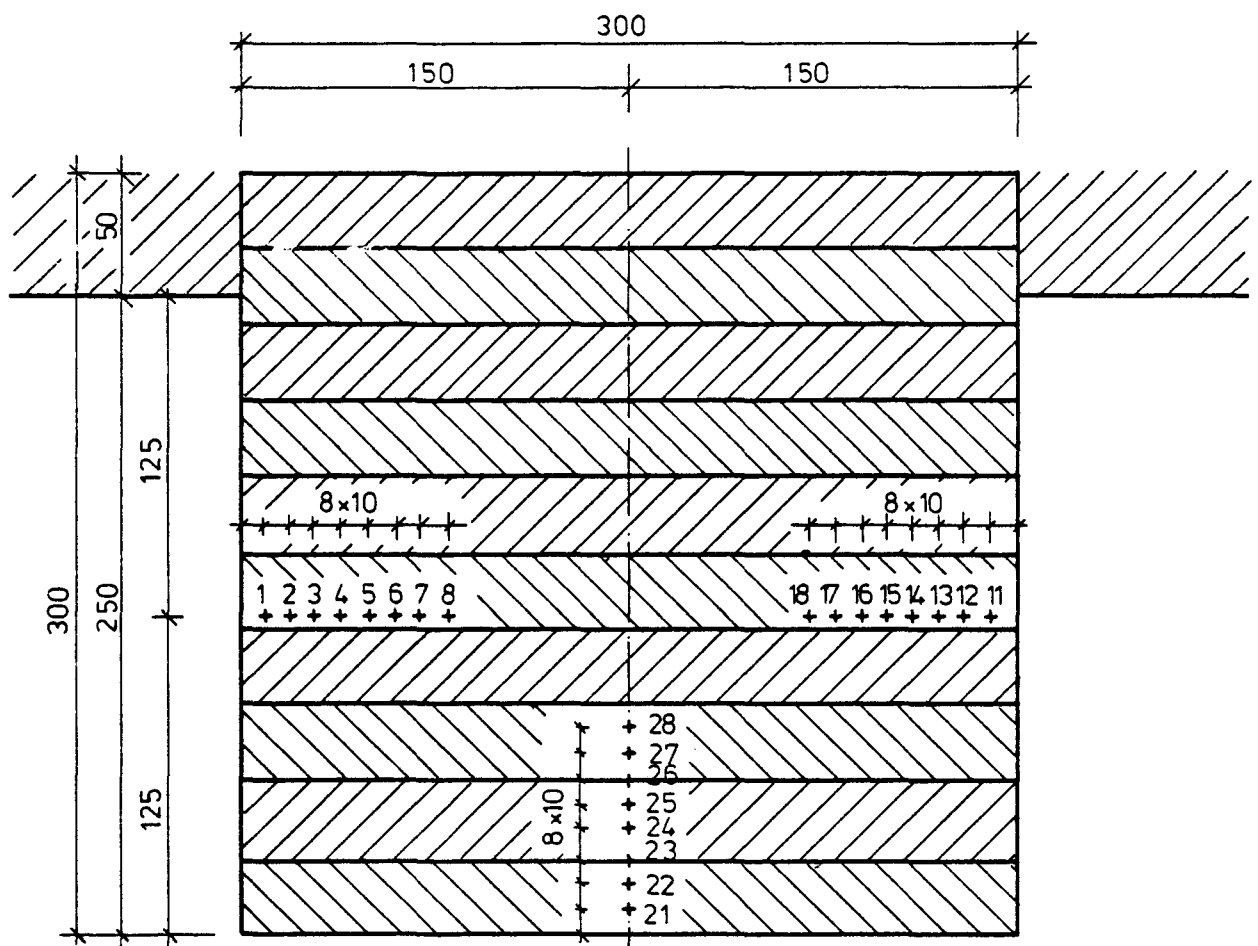
Anlage 1.4 : Meßstellen in den Spanplatten



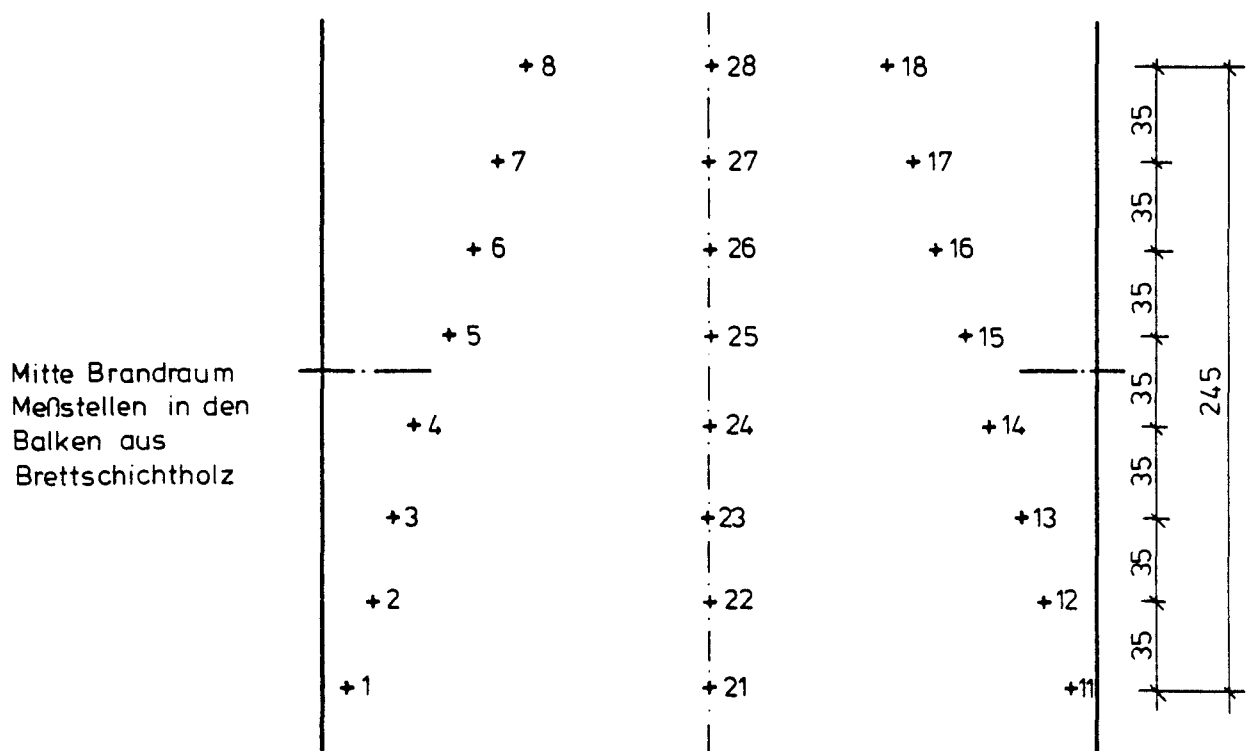
Anstelle der hier angegebenen Meßstellen-Nummern 1 - 10 gelten auch die Nummern 41 - 50, d.h.:

Meßstelle	1	~	41
"	2	~	42
"	⋮	~	⋮
Meßstelle	10	~	50

Anlage 1.5: Meßstellen in den Holzbohlen



Schnitt Balken 30/30



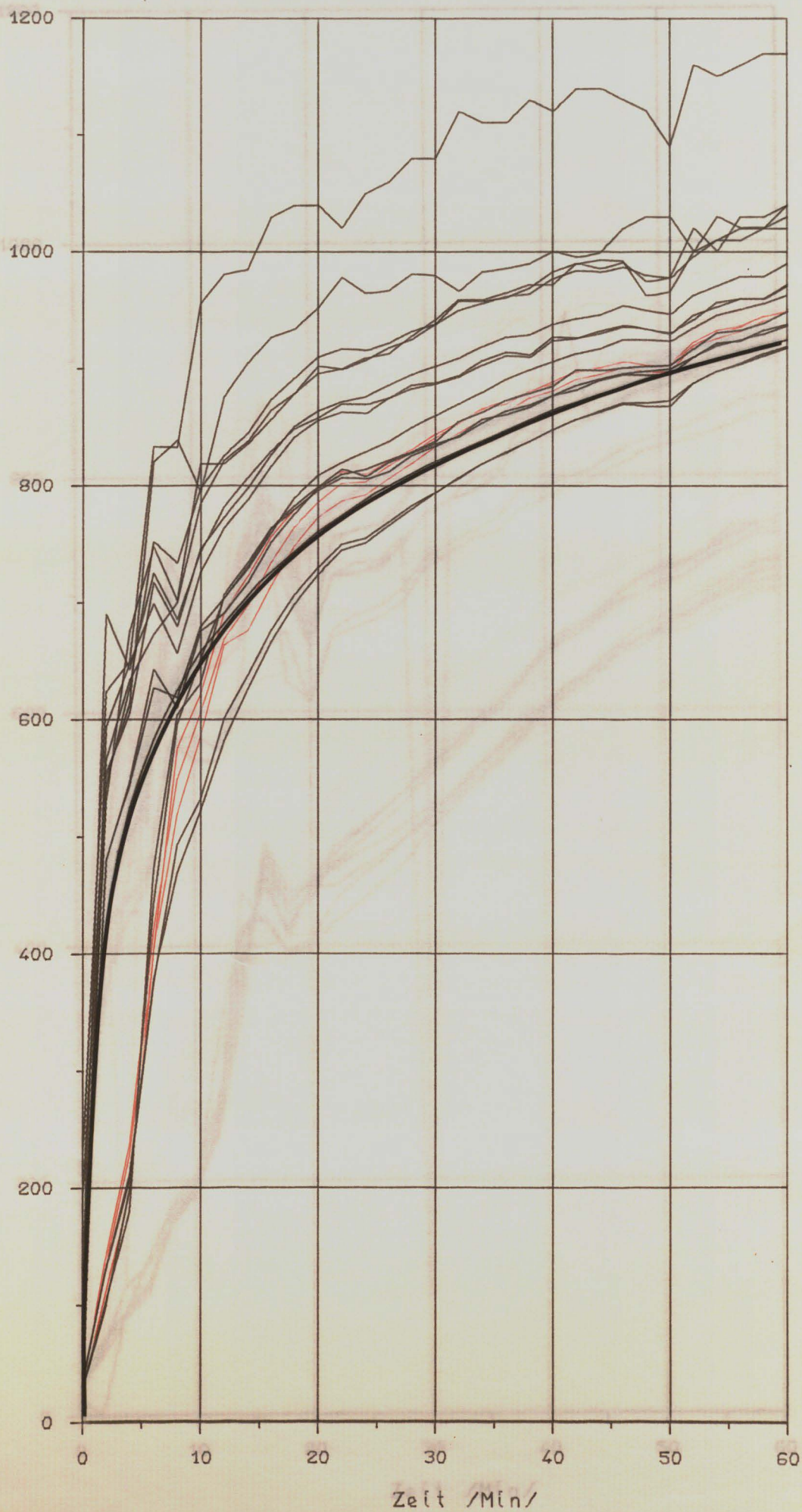
Draufsicht Balken 30/30

Anlage 1.6 Meßstellen in den Holzbalken

Anlage 2.1

Versuch - Nr. 1, Mst. 1-17

Temperatur in Grad Celsius



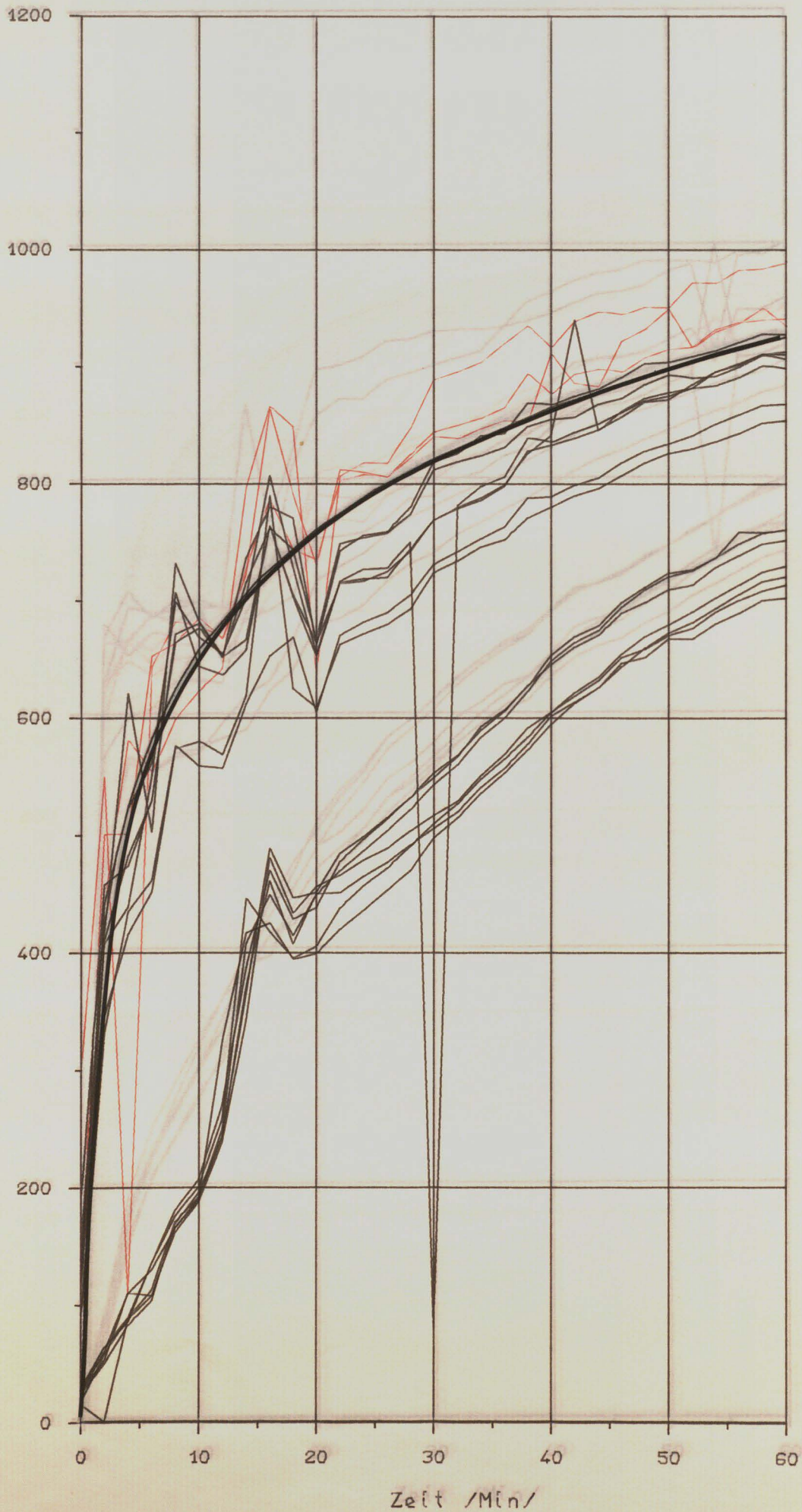
8

3
4
5
7
10
11
12
13
14
15
16
17
K

Anlage 2.2

Versuch - Nr. 2, Mst. 1-17

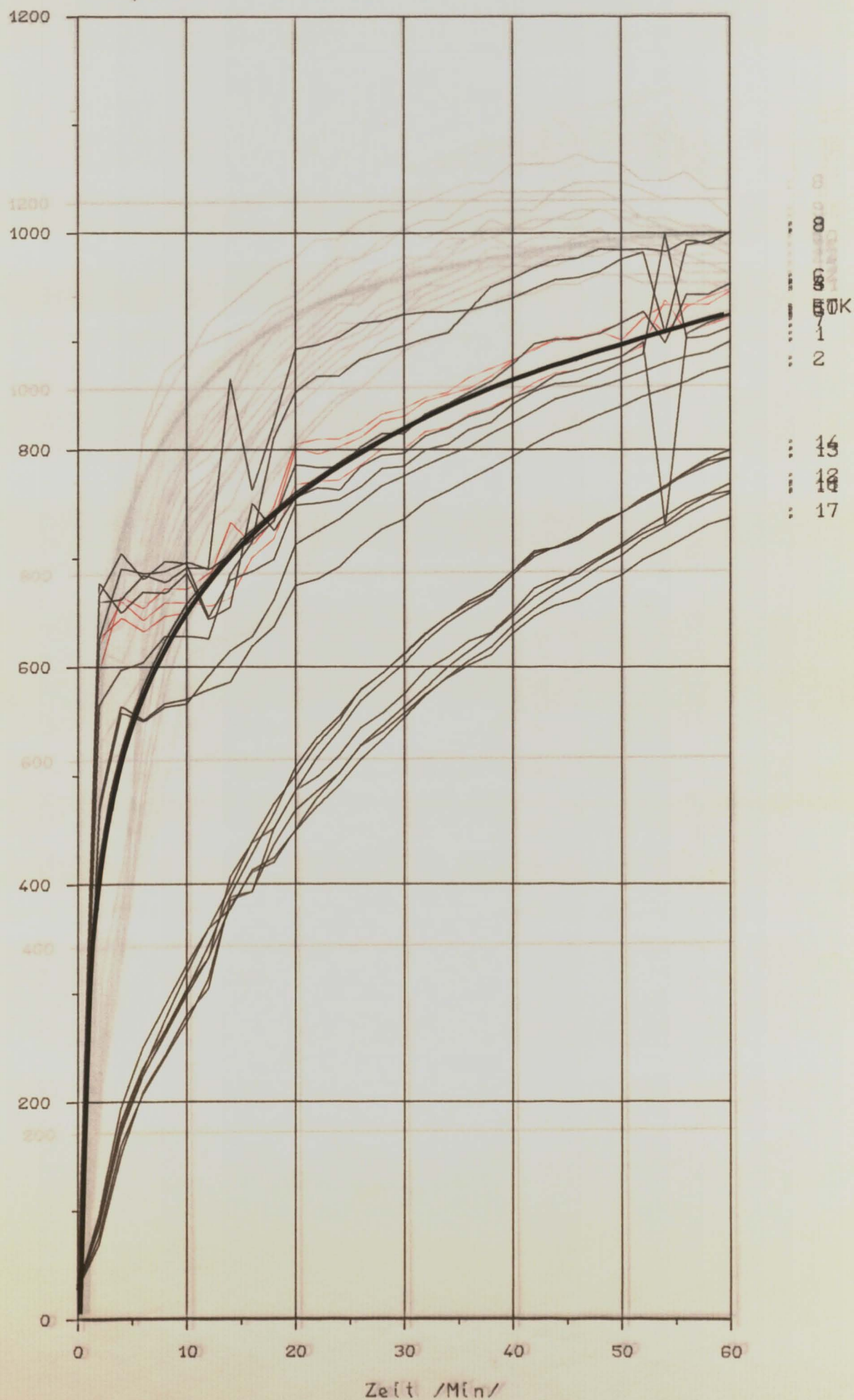
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 2.3

Versuch - Nr. 3, Mst. 1-17

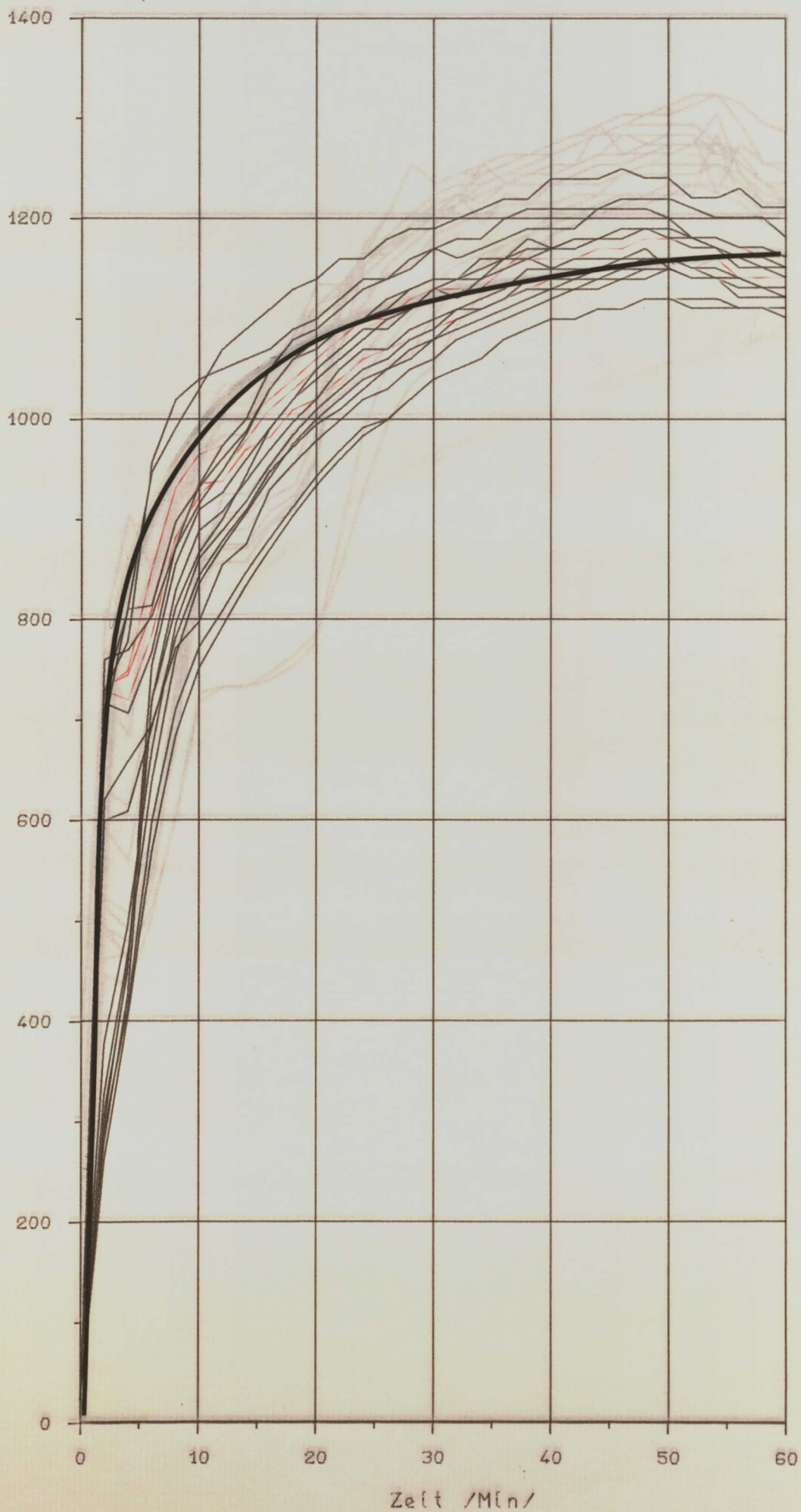
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 2.4

Versuch - Nr. 4, Mst. 1-17

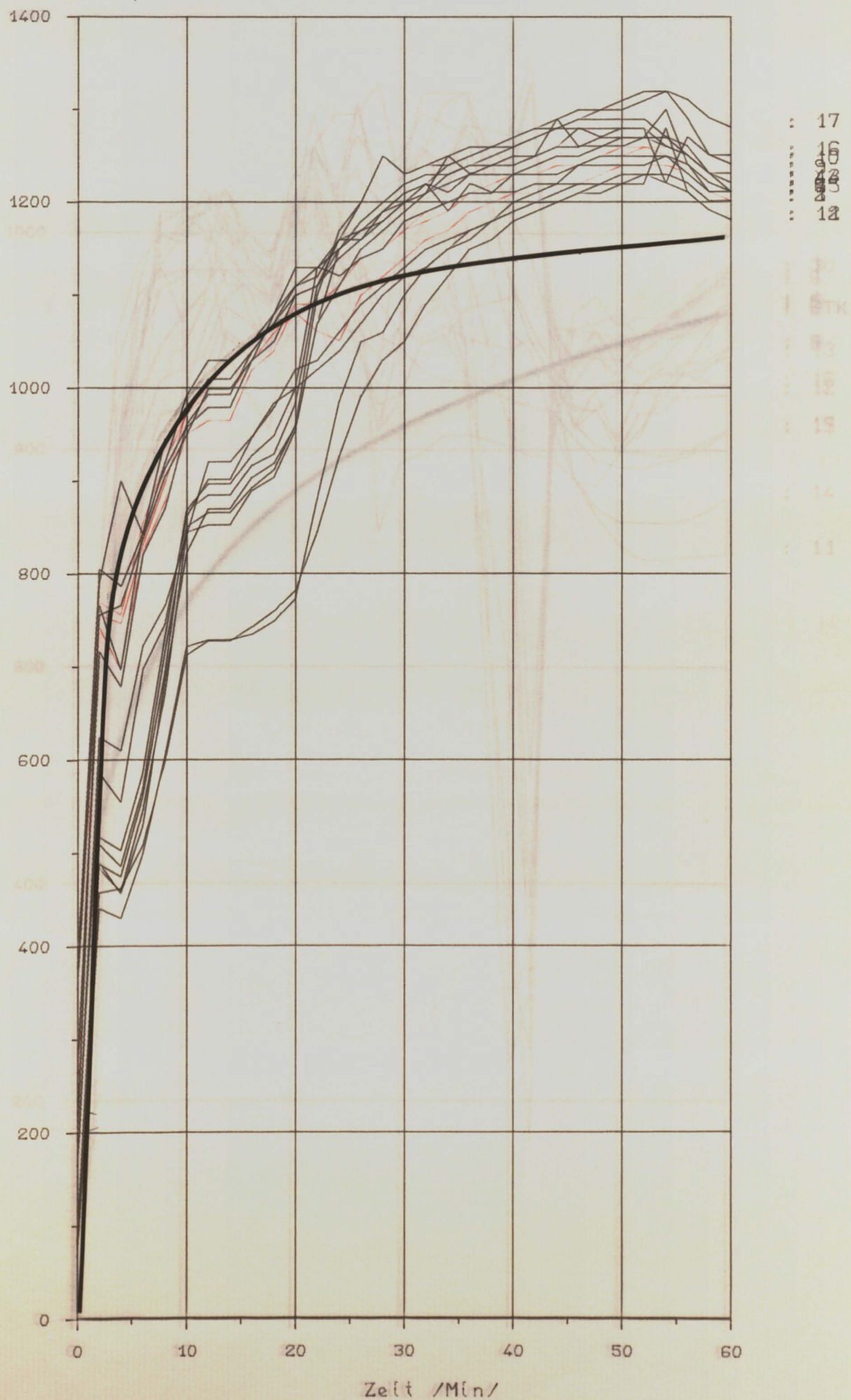
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 2.5

Versuch - Nr. 5, Mst. 1-17

Temperatur in Grad Celsius



Anlage 2.6

Versuch - Nr. 6, Mst. 1-17

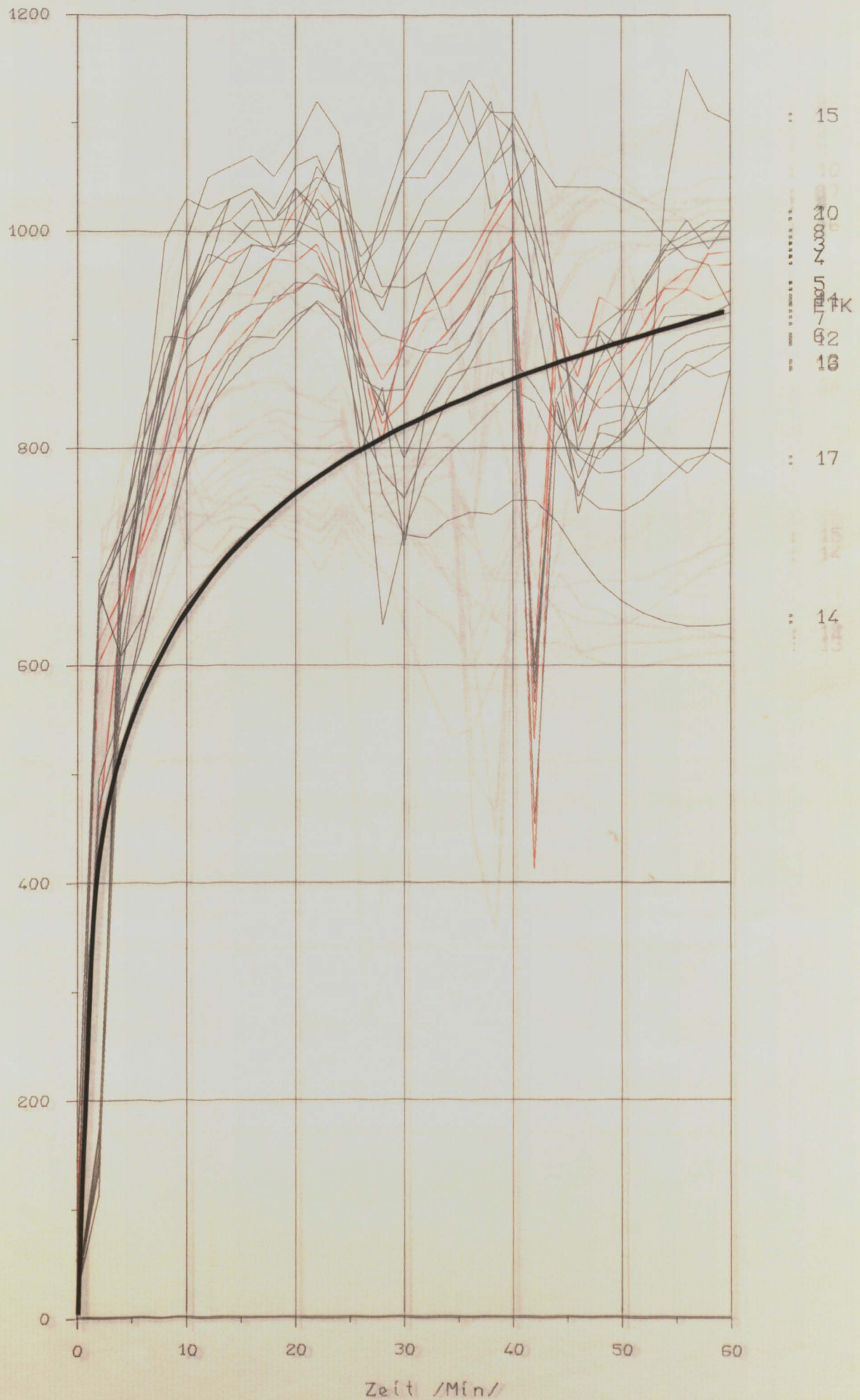
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 2.7

Versuch - Nr.7, Mst. 1-17

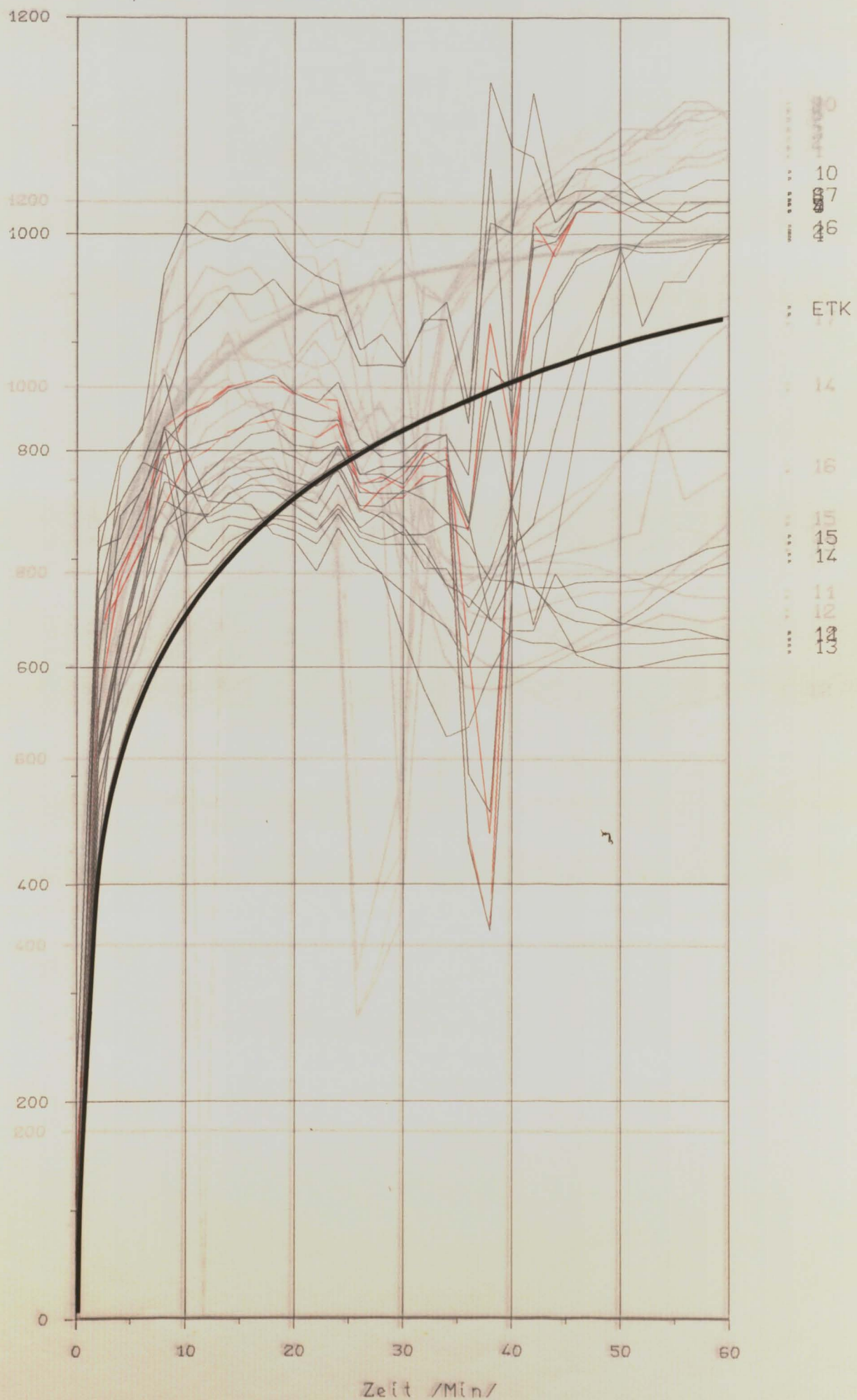
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 2.8

Versuch - Nr.8, Mst. 1-17

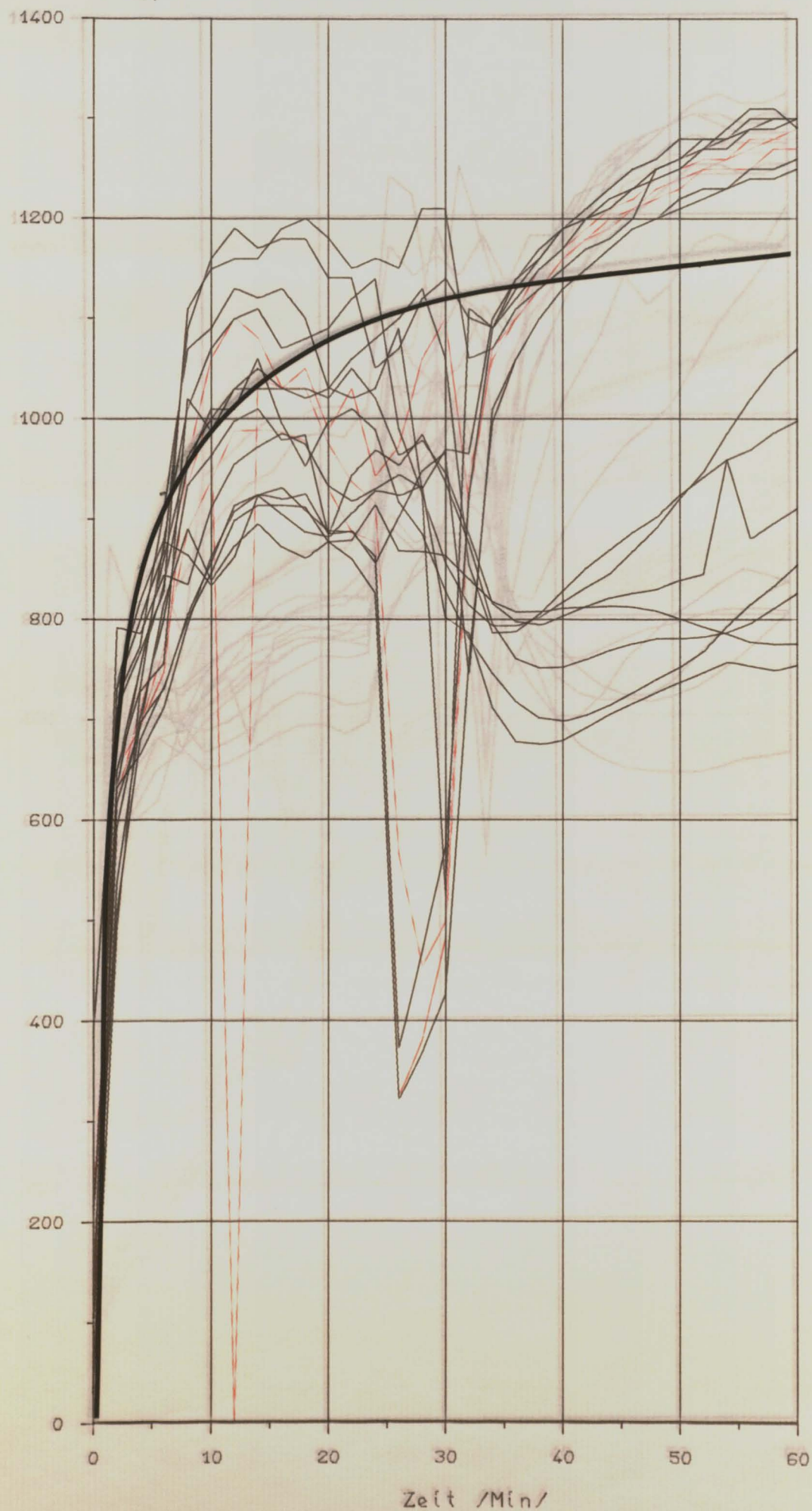
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 2.9

Versuch - Nr. 9, Mst. 1-17

Temperatur in Grad Celsius

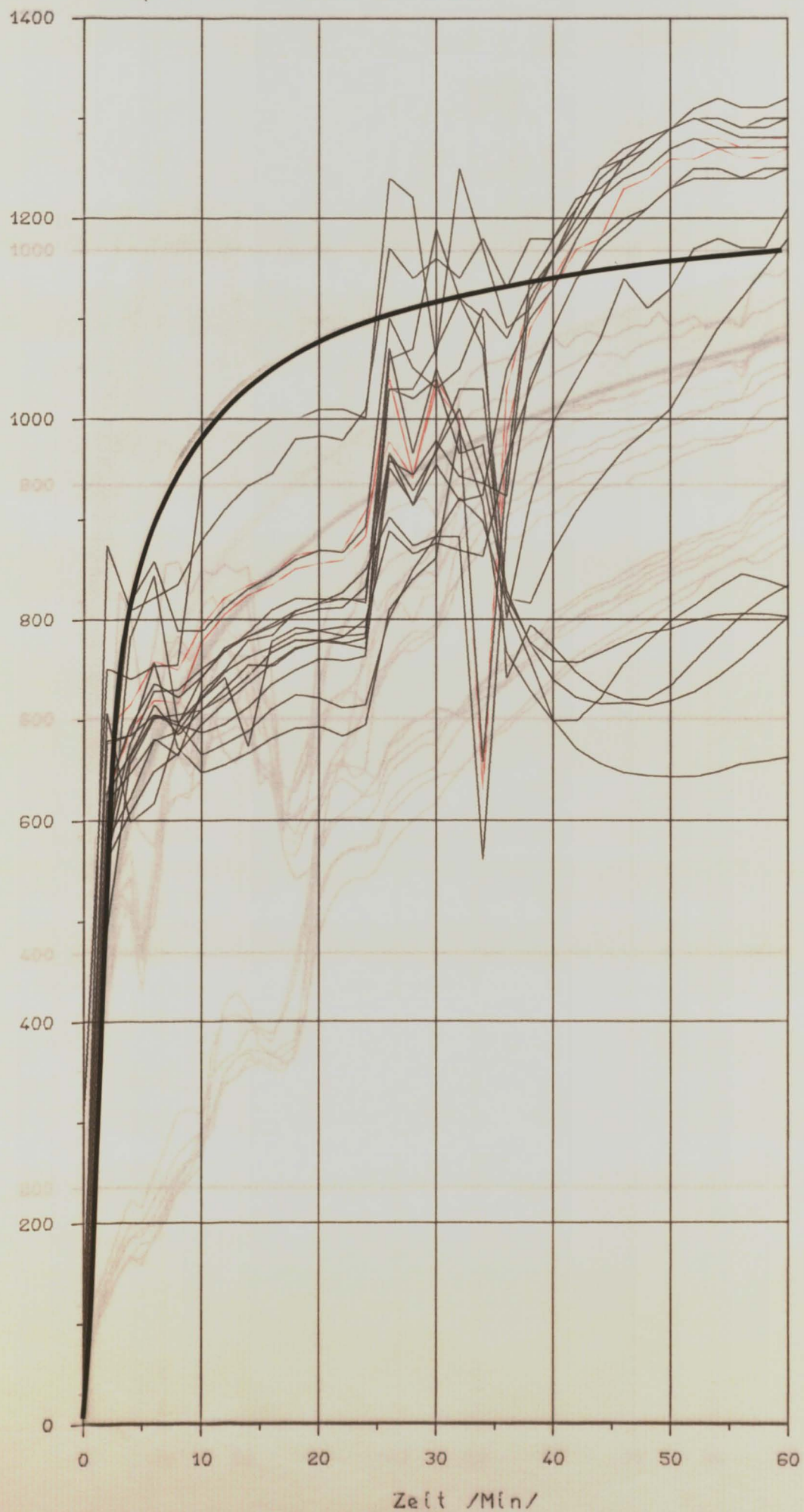


0
1
16
17
: 17
: 14
: 16
: 15
: 13
: 13
: 11
: 12
: 12

Anlage 2.10

Versuch - Nr. 10, Mst. 1-17

Temperatur in Grad Celsius

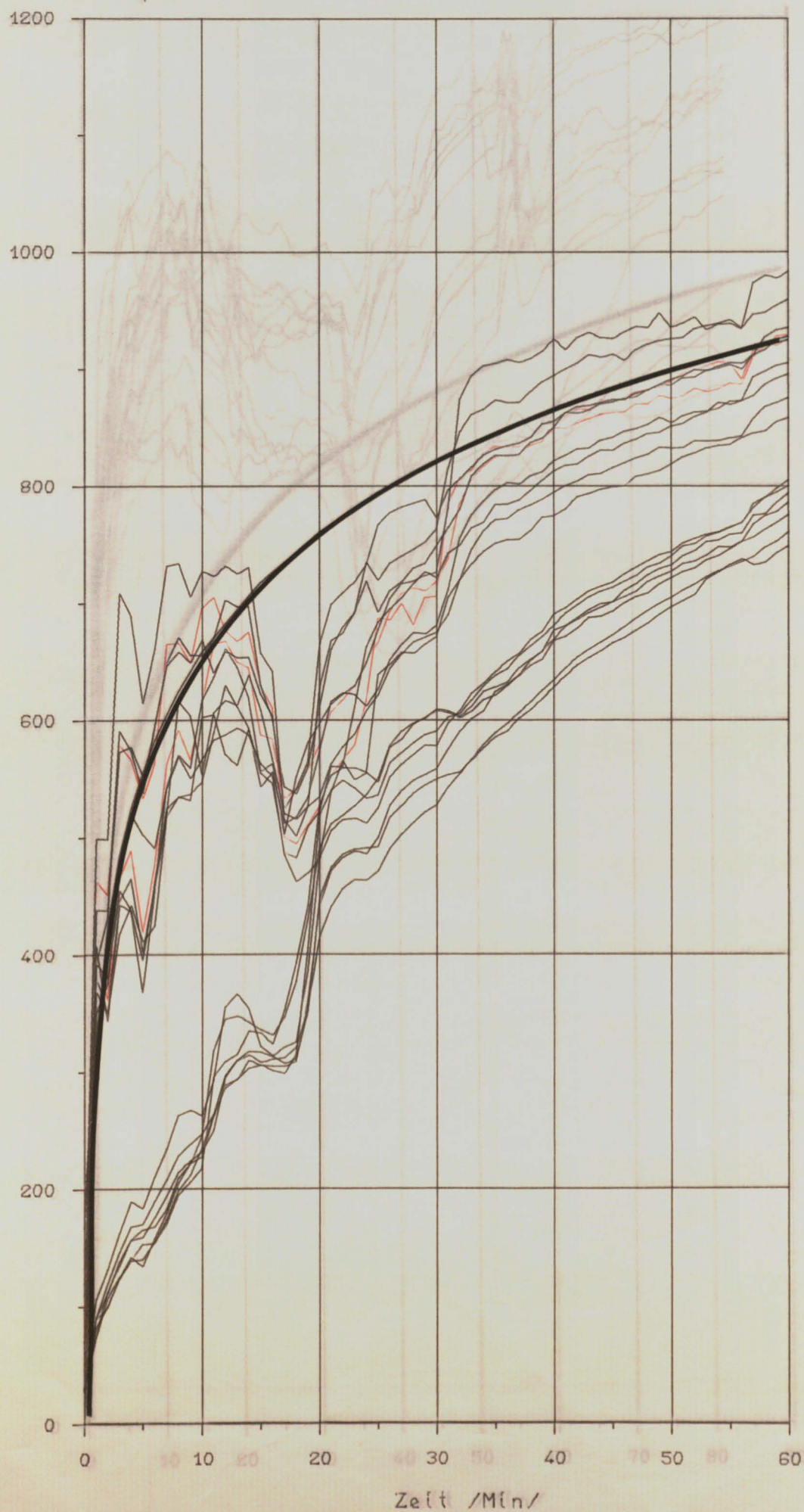


: 8
: 90
: 5
: 2
: 16
: 17
: 10
: 4
: 8K
: 7
: 6
: 2
: 1
: 14
: 13
: 12

Anlage 2.11

Versuch - Nr. 11, Mst. 1-17

Temperatur in Grad Celsius

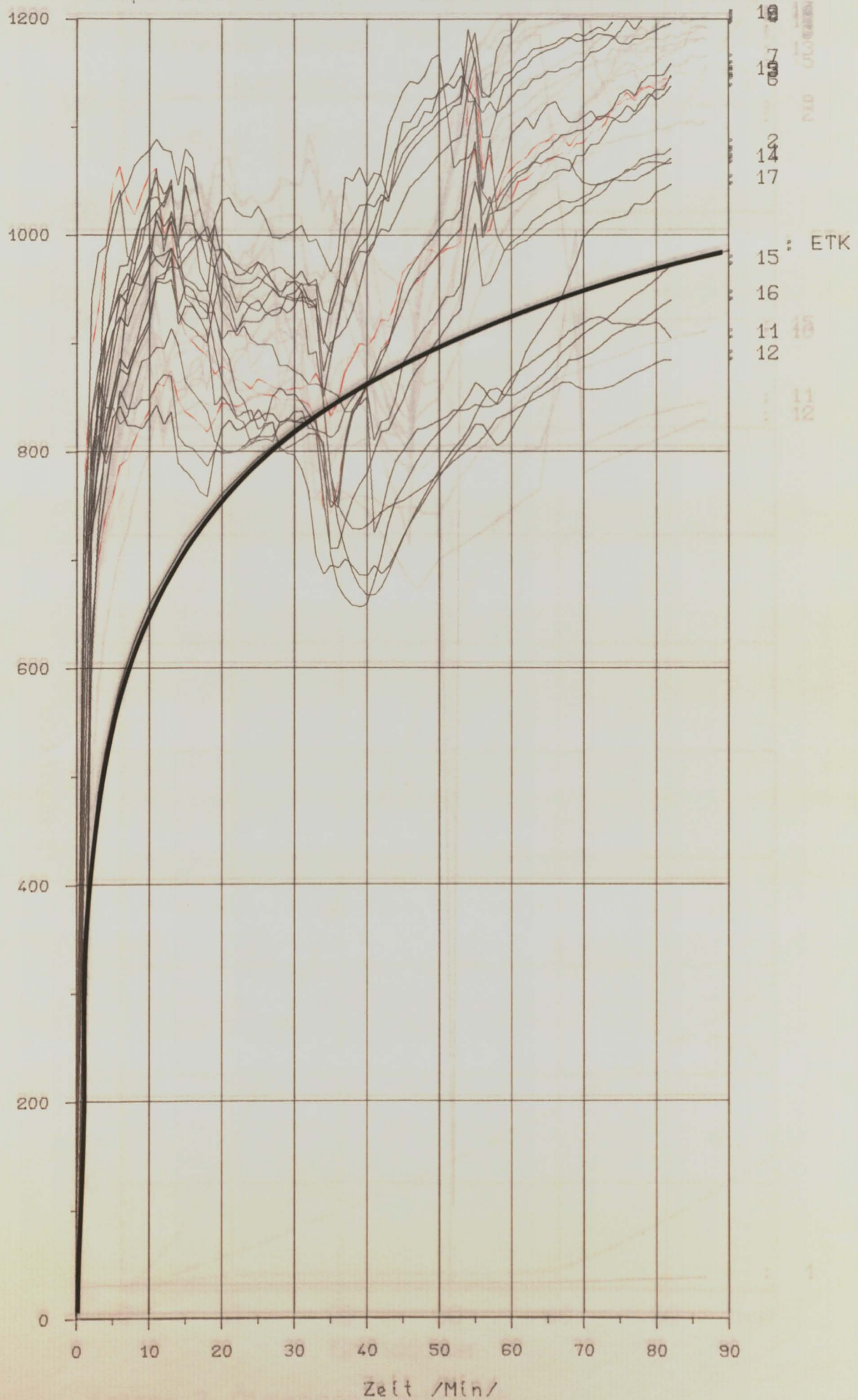


10
7
19
2
14
17
15
16
11
12
10
4
8
EOK
7
6
2
1
16
15
14
13
12
11

Anlage 2.12

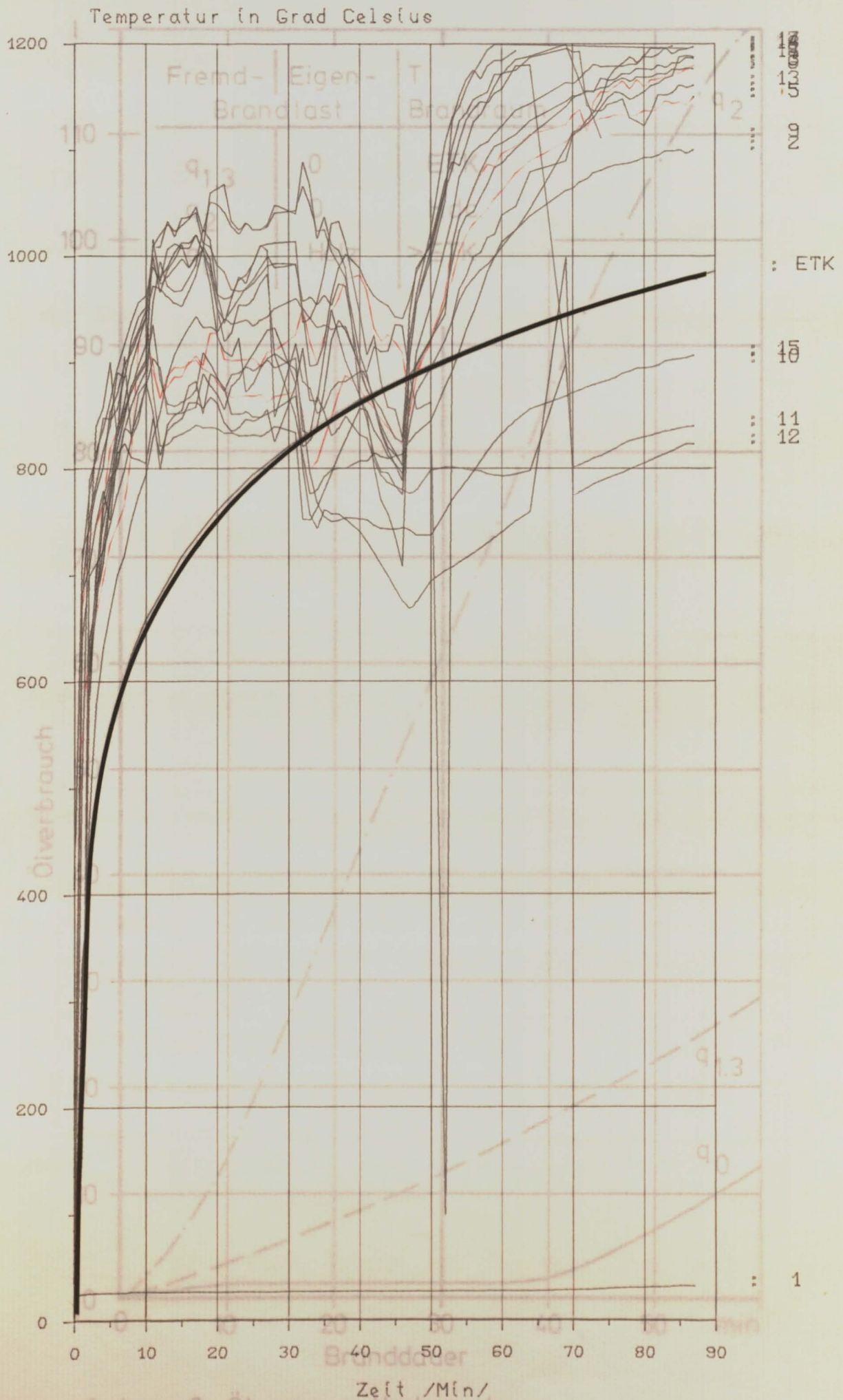
Versuch - Nr. 12, Mst. 1-17

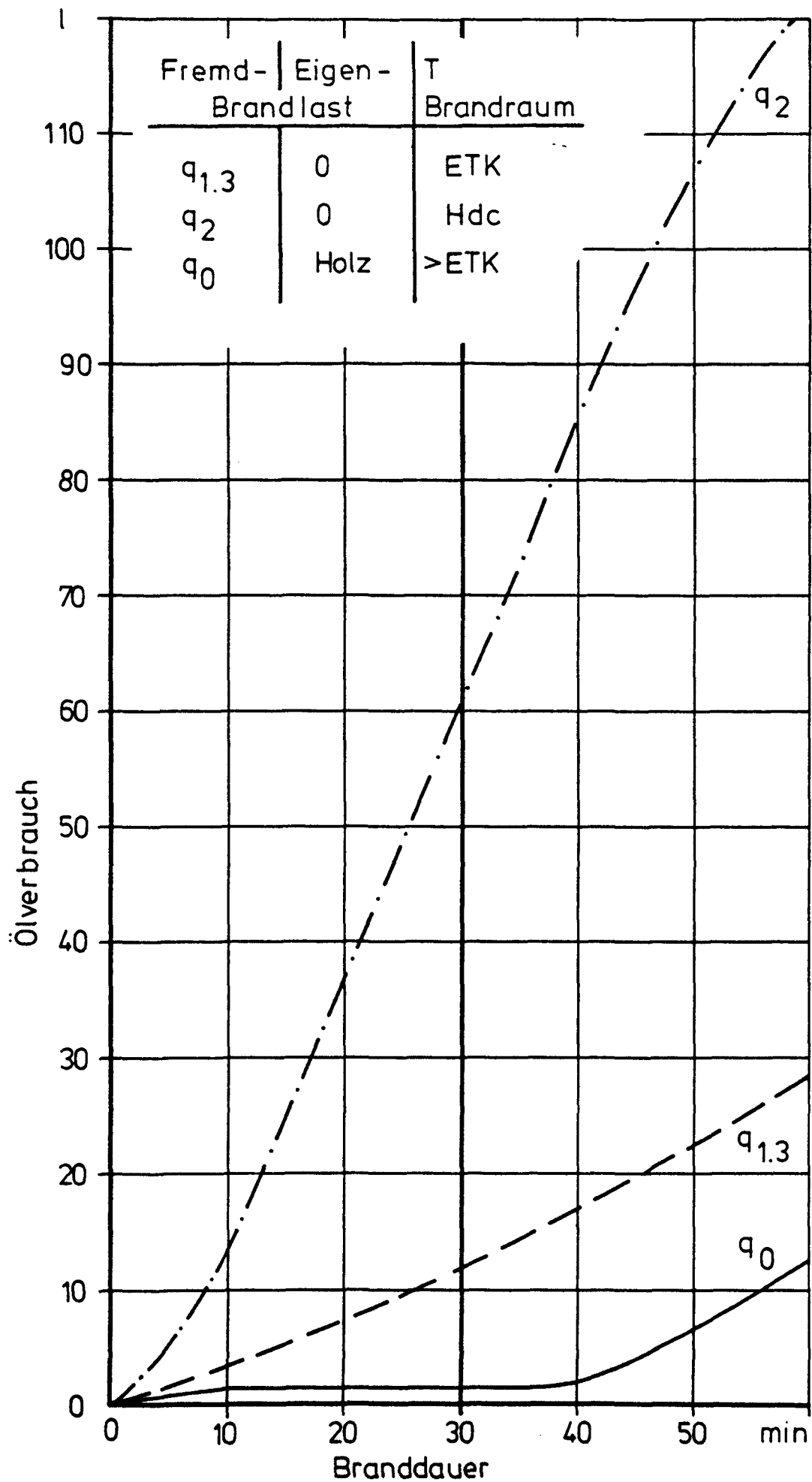
Temperatur in Grad Celsius



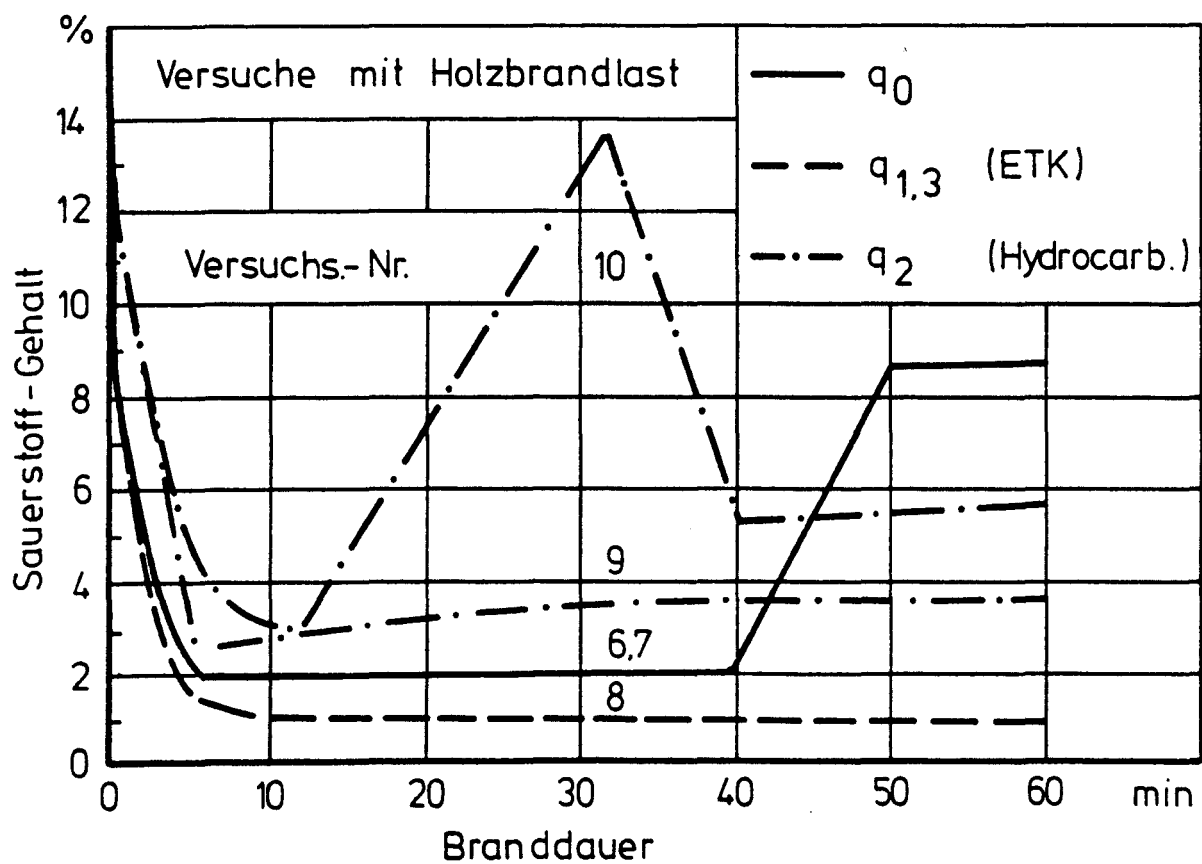
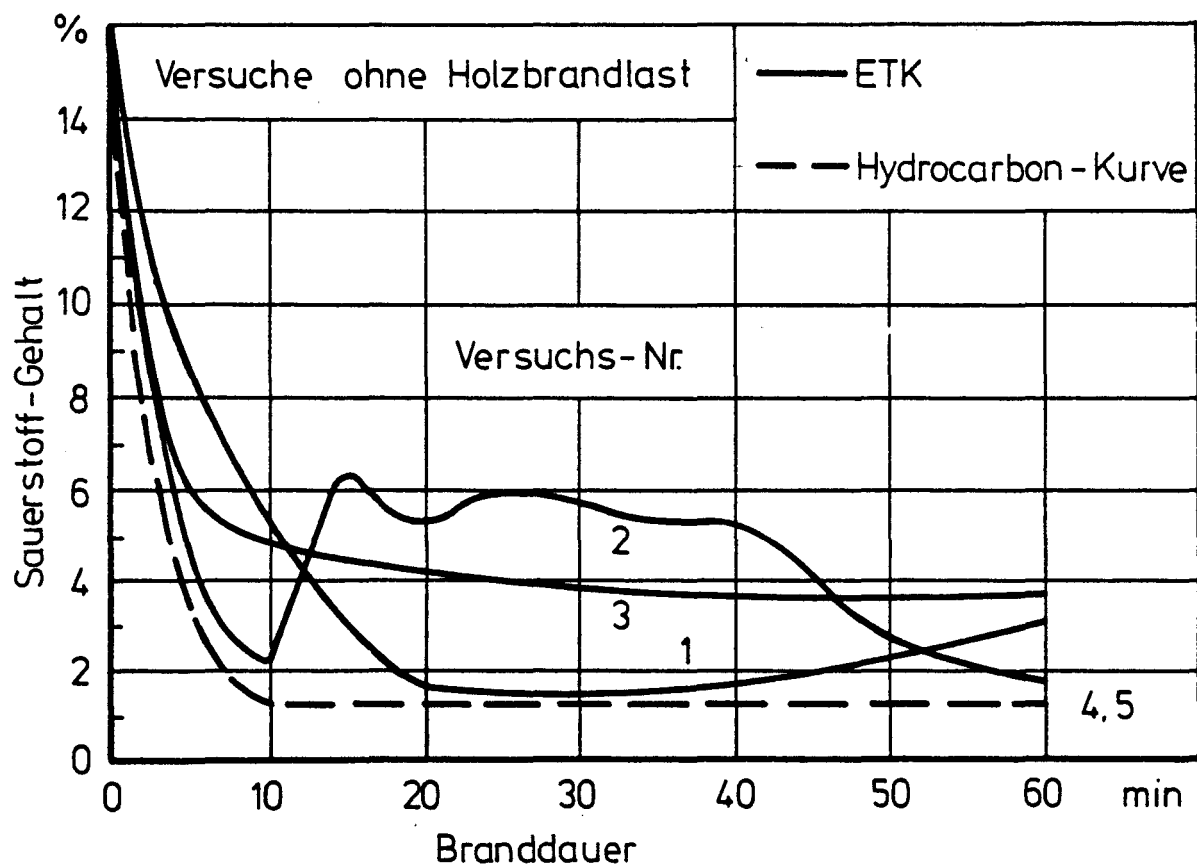
Anlage 2.13

Versuch - Nr. 13, Mst. 1-17





Anlage 3: Ölmengen-Verbrauch

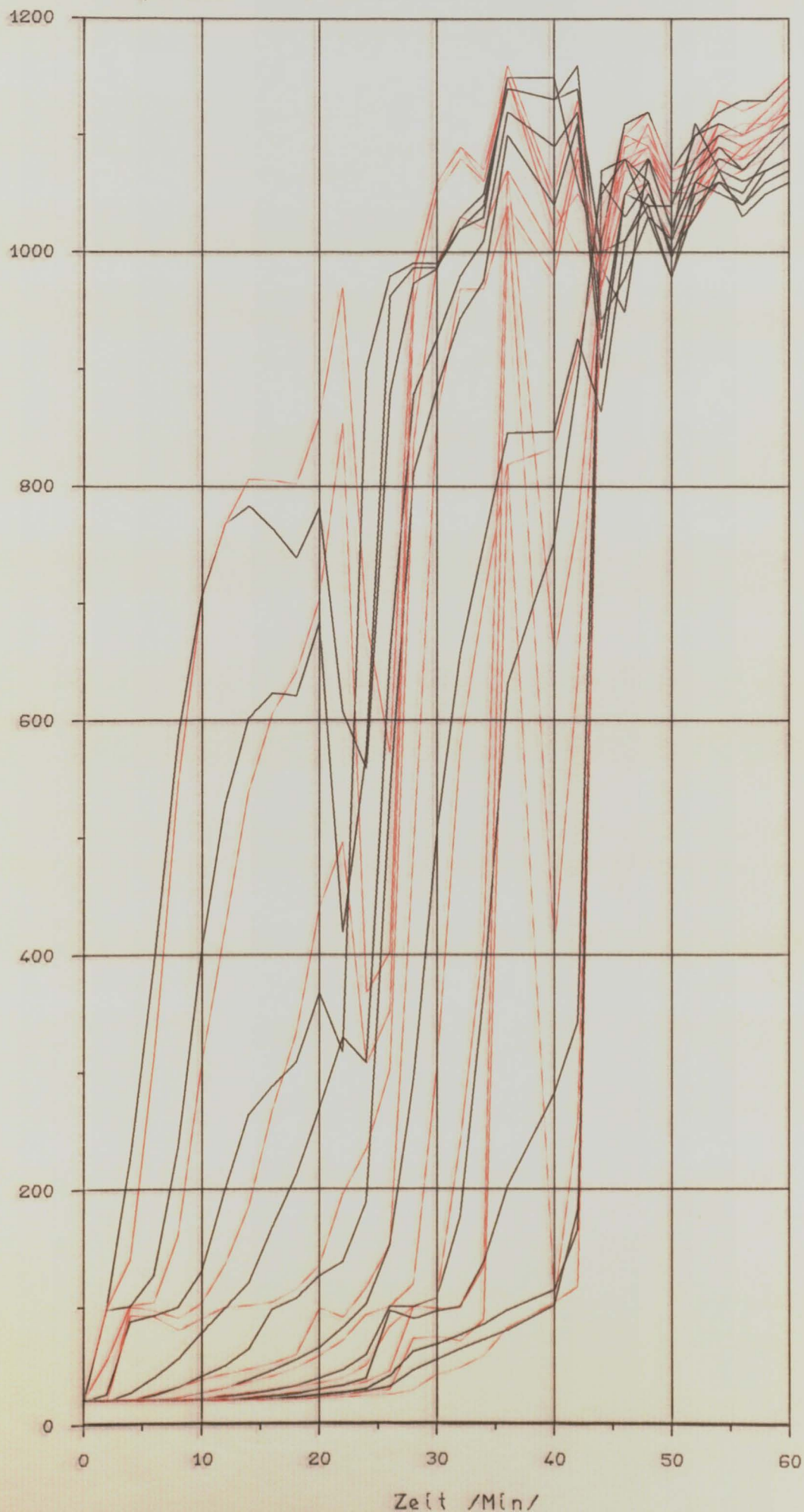


Anlage 4: Sauerstoff - Gehalt bei den Versuchen 1 - 10

Anlage 5.1.1

Versuch-Nr. 6, Mst. 21-30 (rot) Mst. 31-40 (schwarz)

Temperatur in Grad Celsius

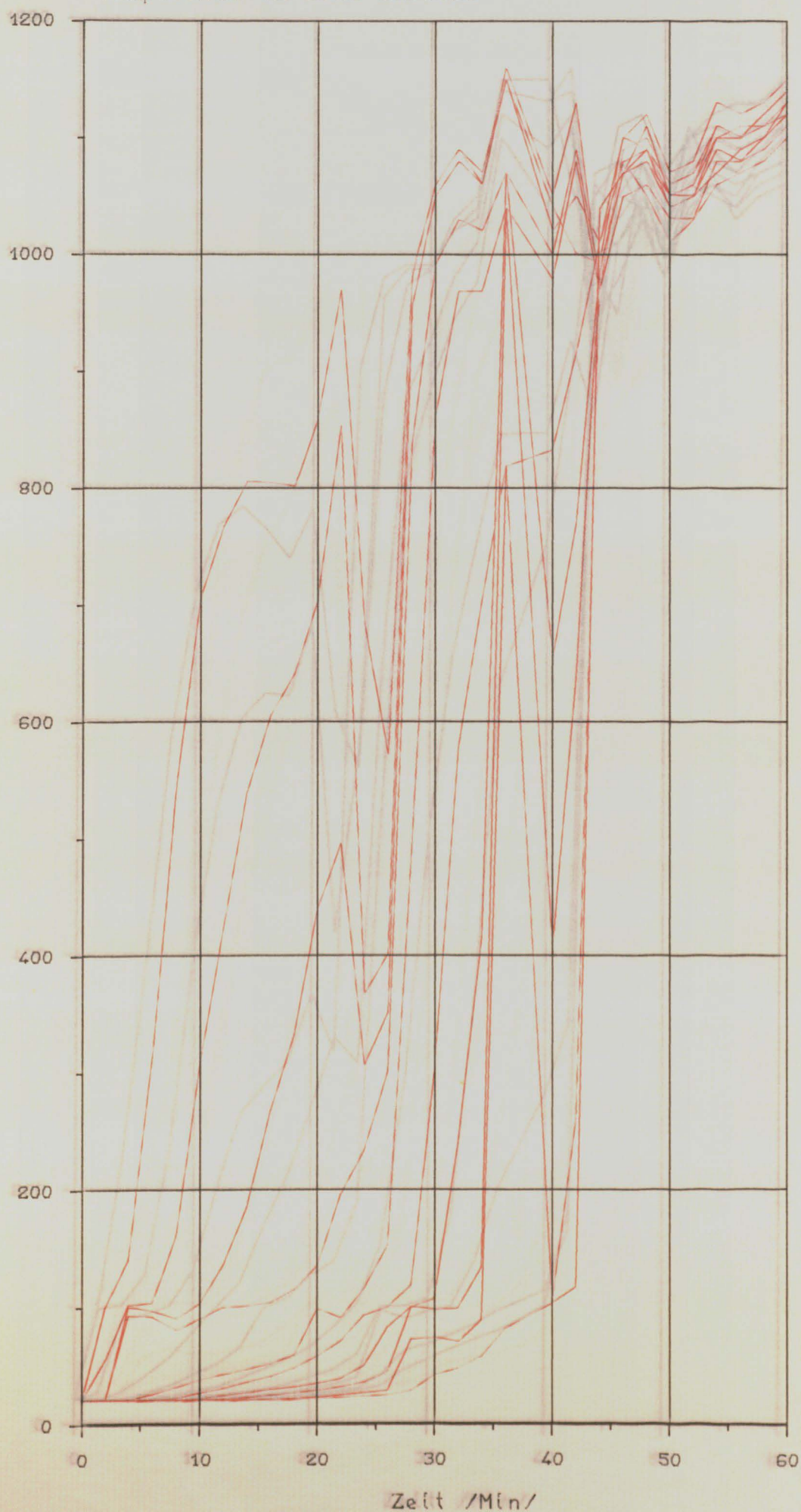


STERN
UND
SONNEN
DRUCK

Anlage 5.1.2

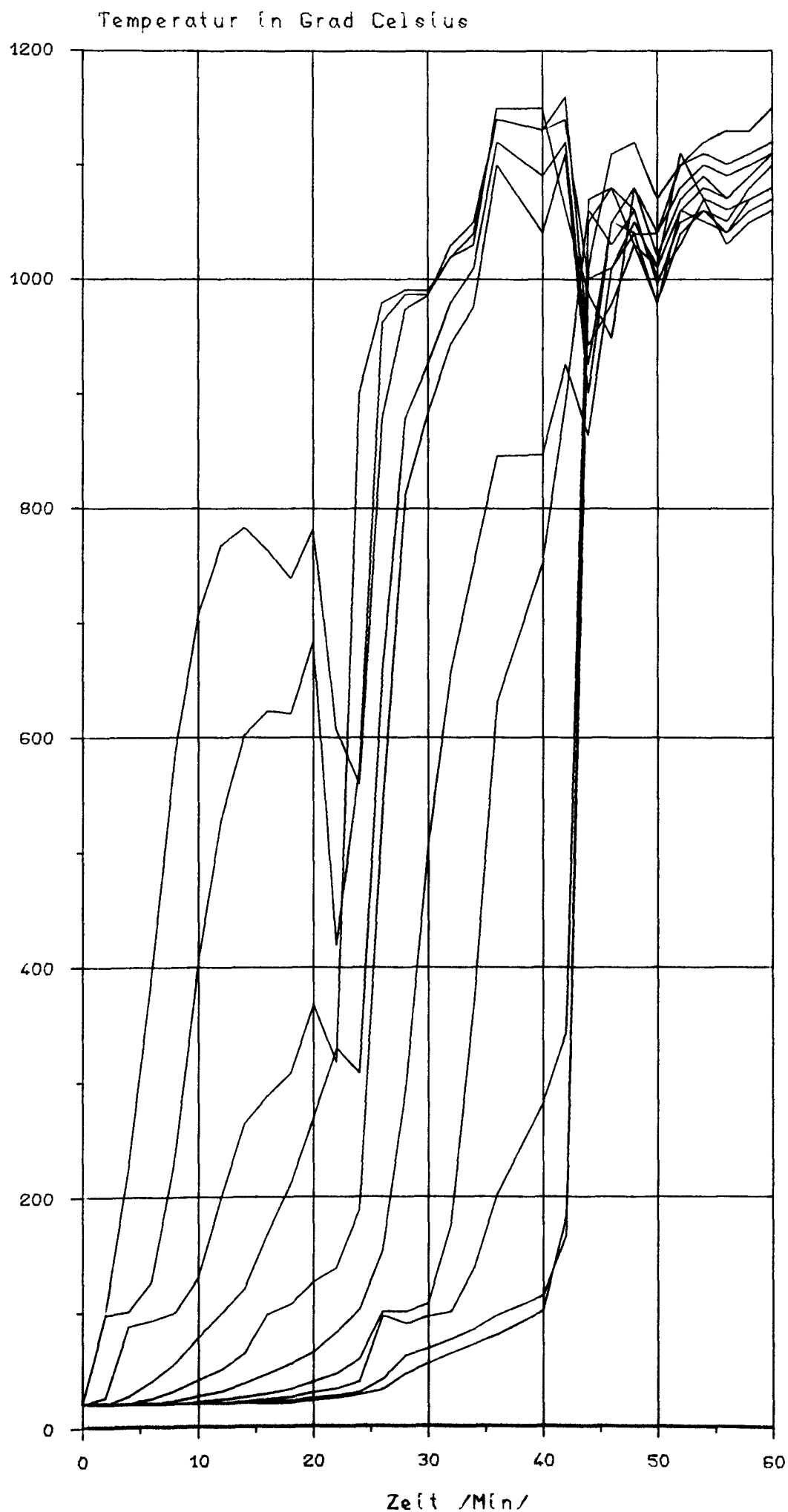
Versuch - Nr. 6, Mst. 21-30

Temperatur in Grad Celsius



ORIGINAL
UNTERSCHIEDLICH
A 100 000 000 000

Anlage 5.1.3
Versuch - Nr.6, Mst.31-40

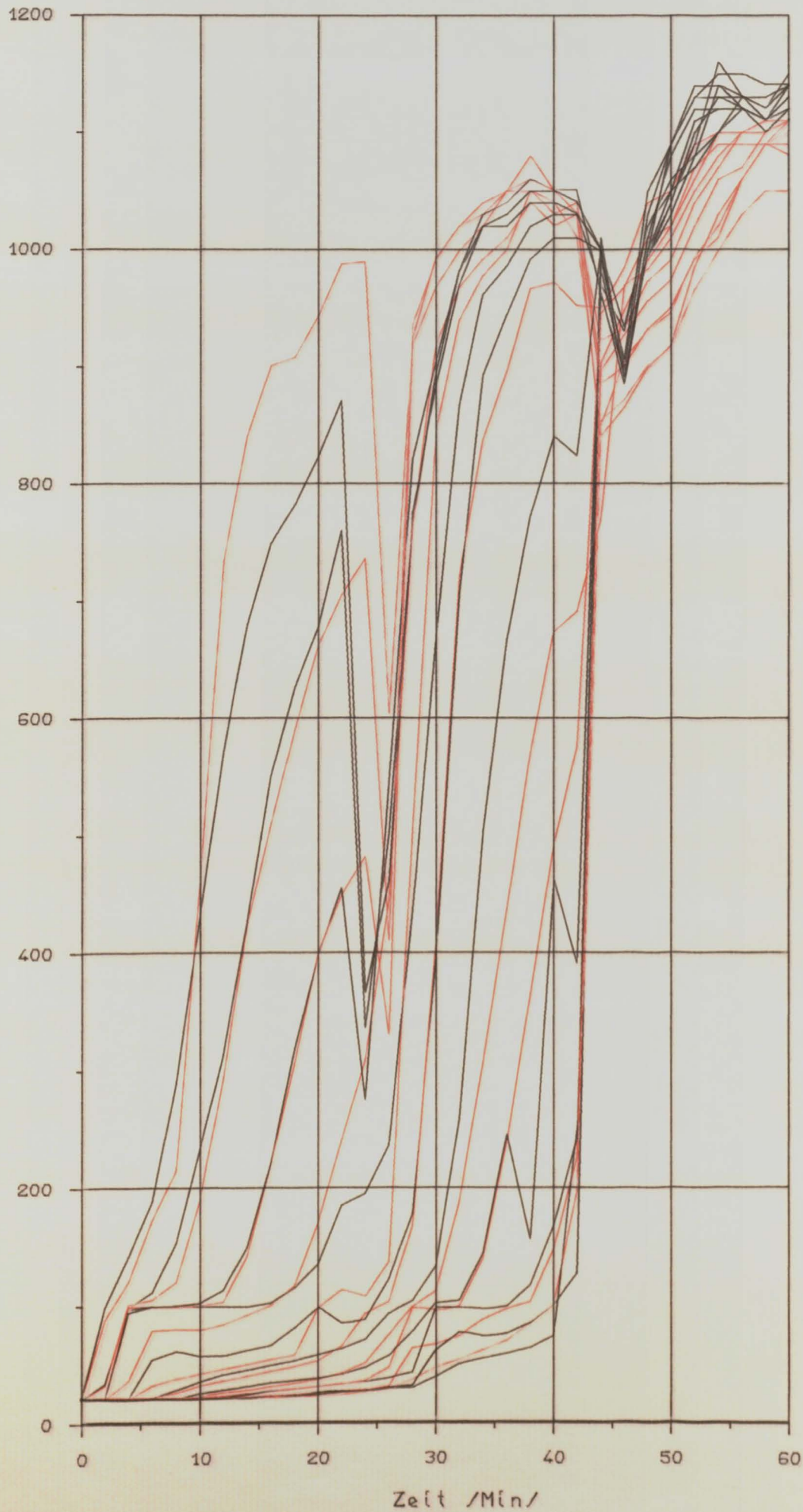


34
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0

Anlage 5.2.1

Versuch-Nr. 7, Mst. 21-30 (rot) Mst. 31-40 (schwarz)

Temperatur in Grad Celsius

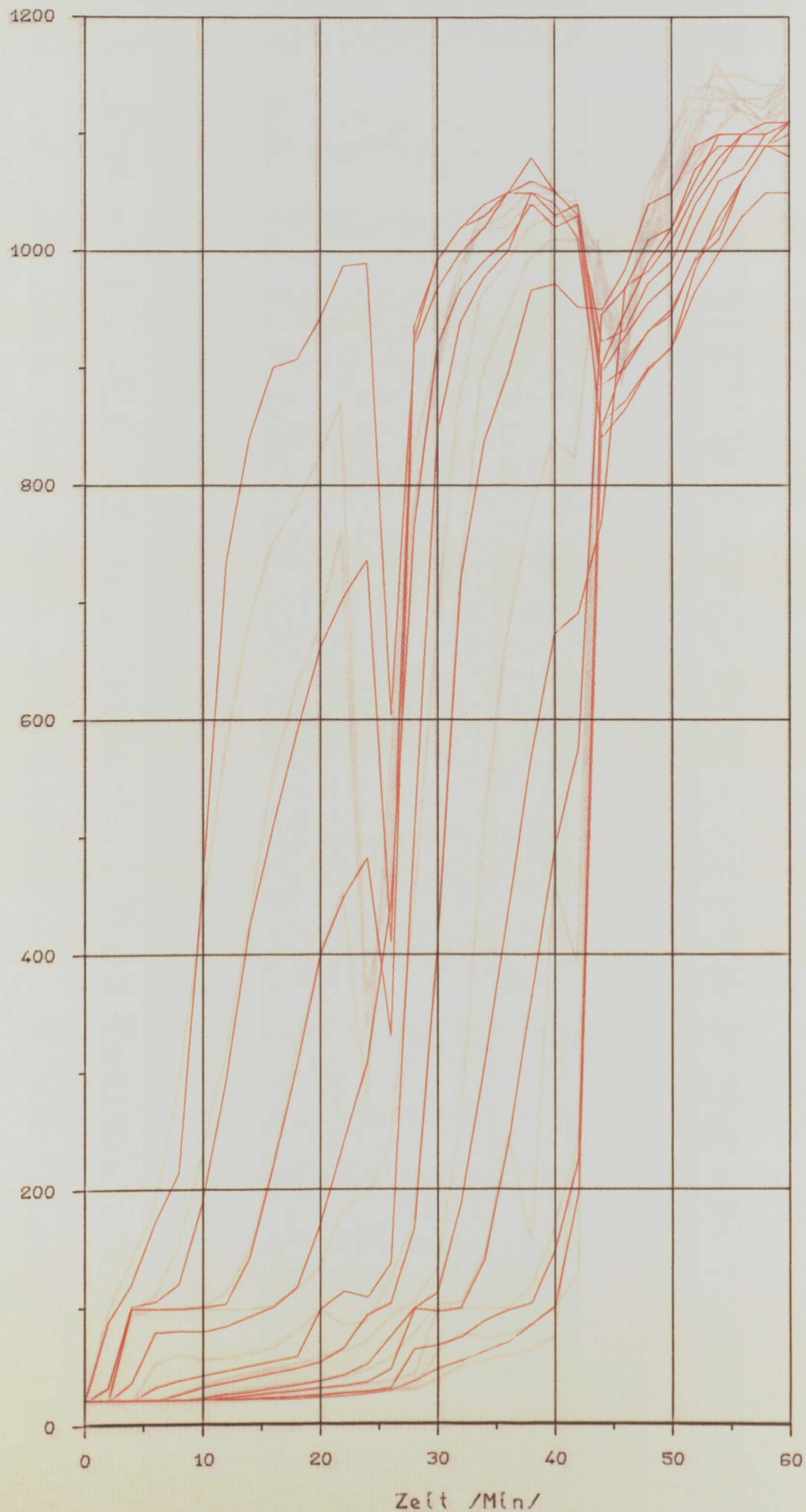


30

Anlage 5.2.2

Versuch - Nr. 7, Mst. 21-30

Temperatur in Grad Celsius

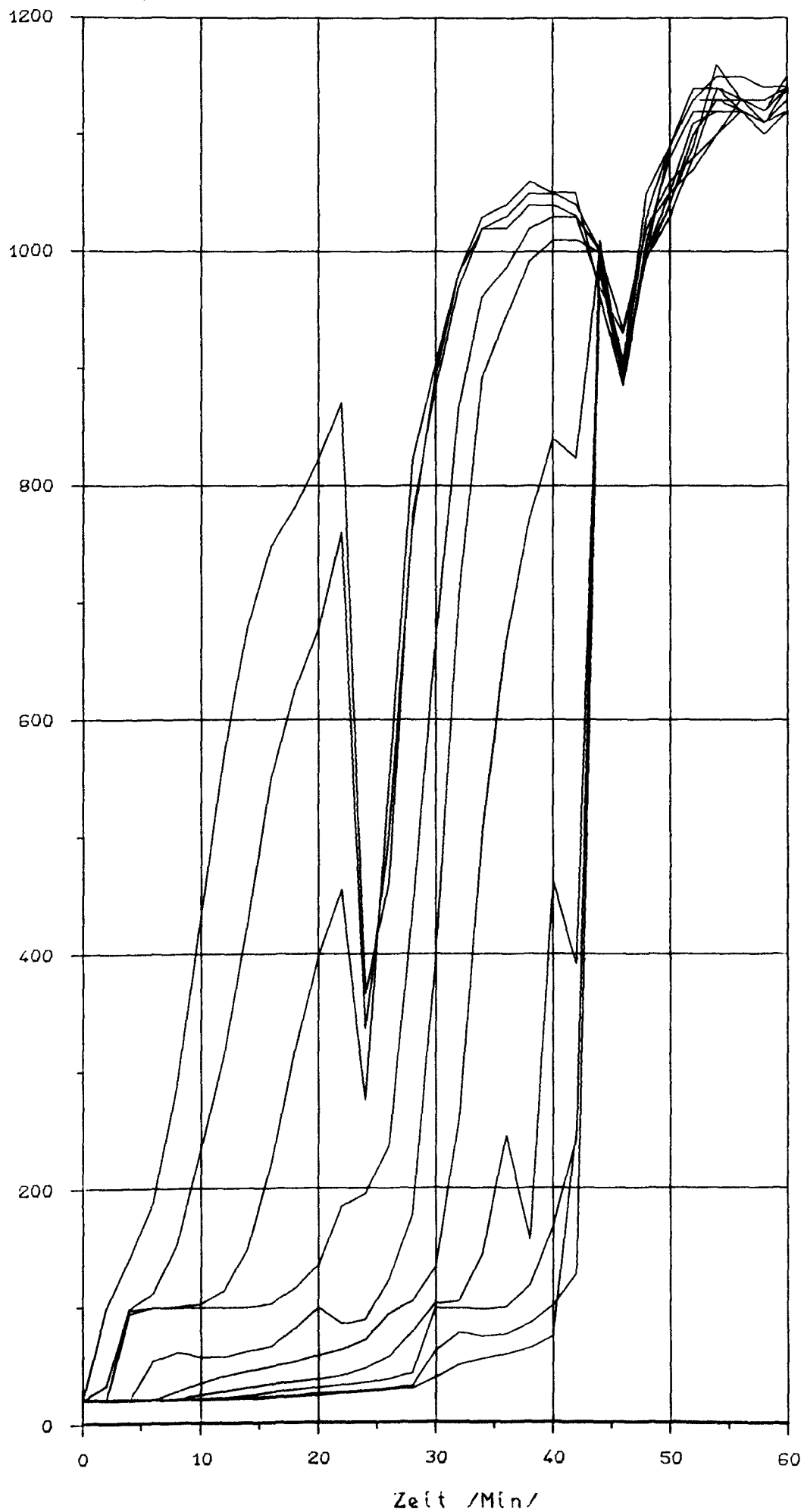


30

Anlage 5.2.3

Versuch - Nr. 7, Mst. 31-40

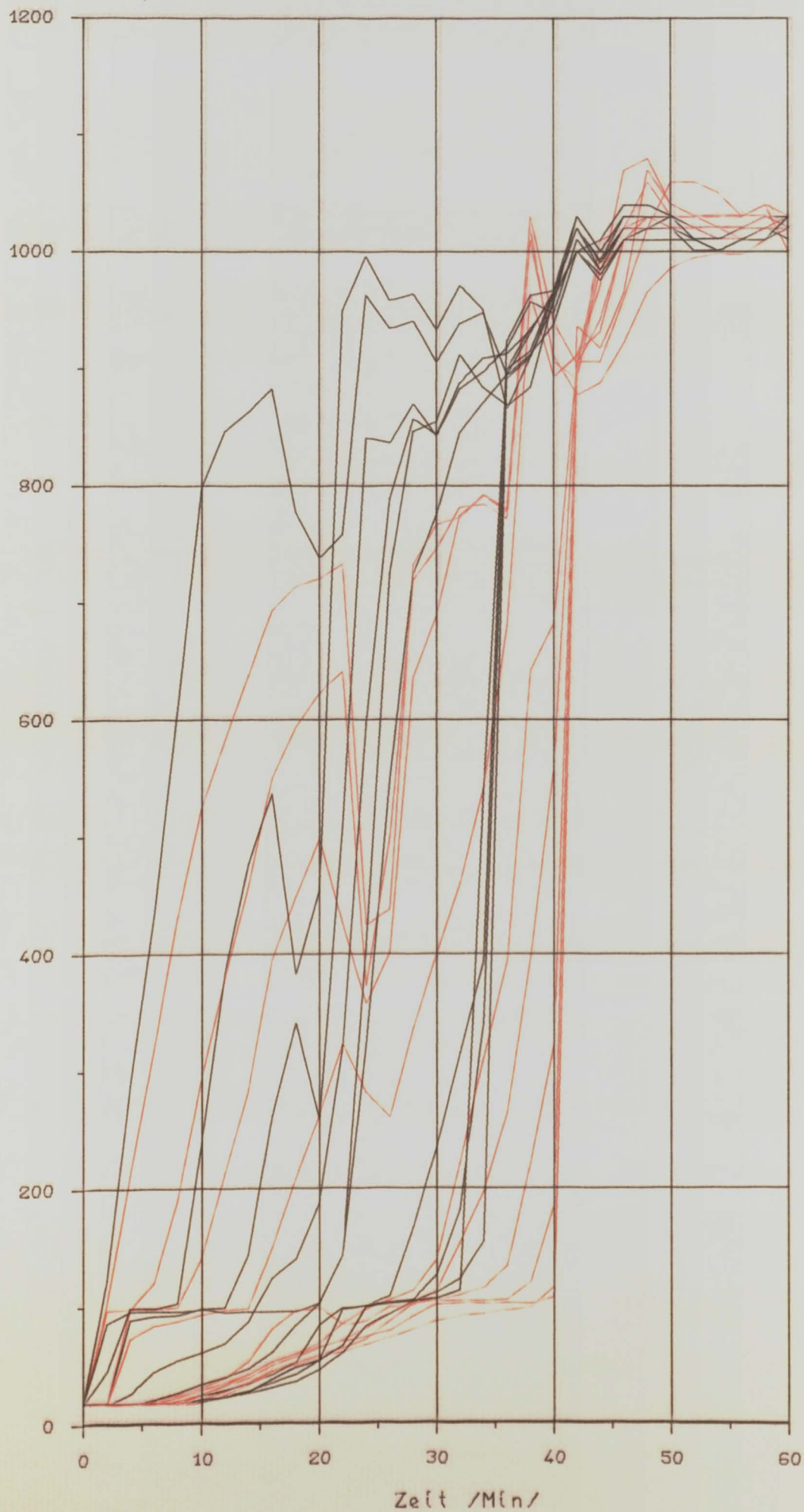
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.3.1

Versuch-Nr. 8, Mst. 21-30 (rot) Mst. 31-40 (schwarz)

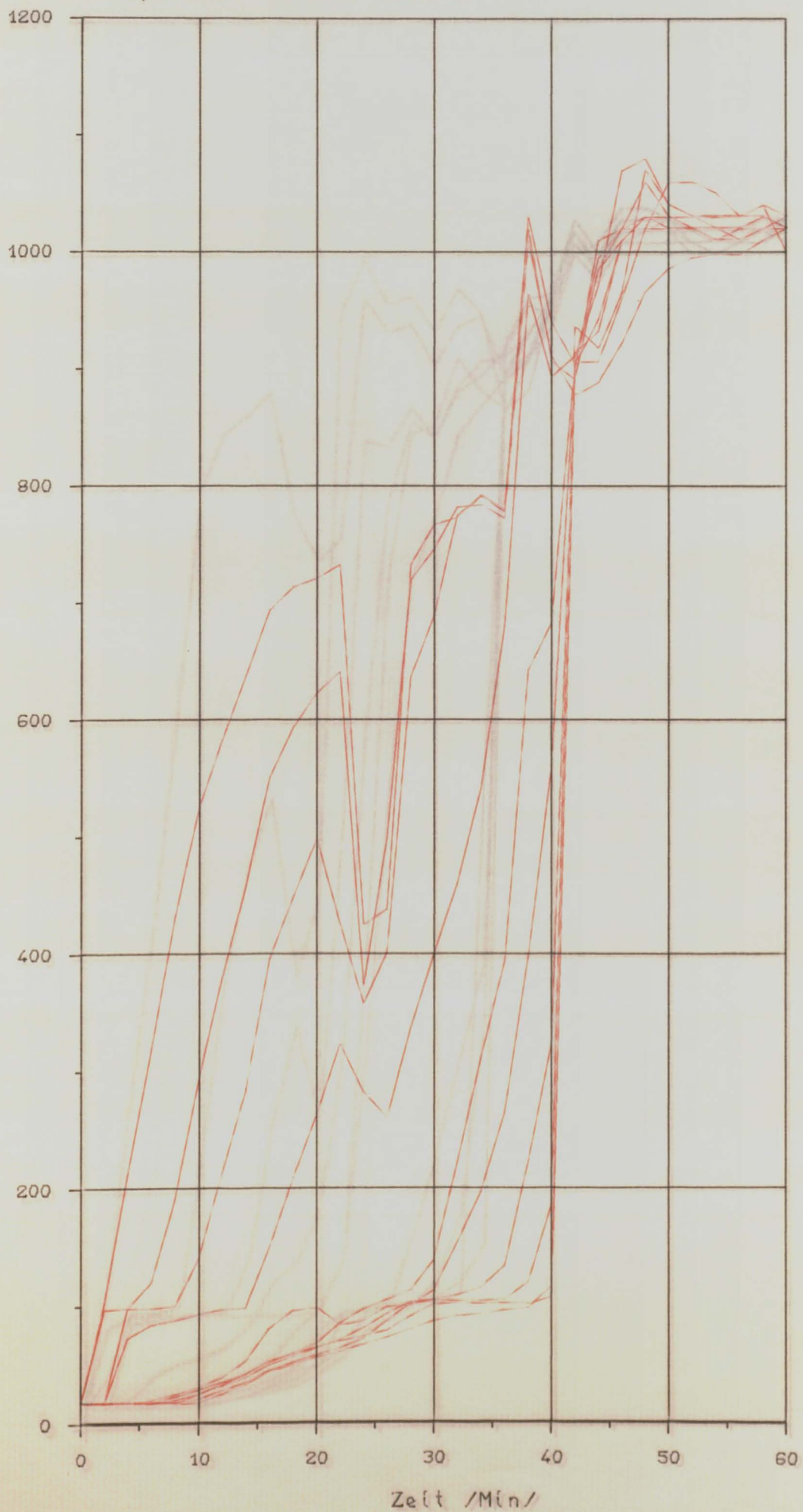
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.3.2

Versuch - Nr.8, Mst.21-30

Temperatur in Grad Celsius

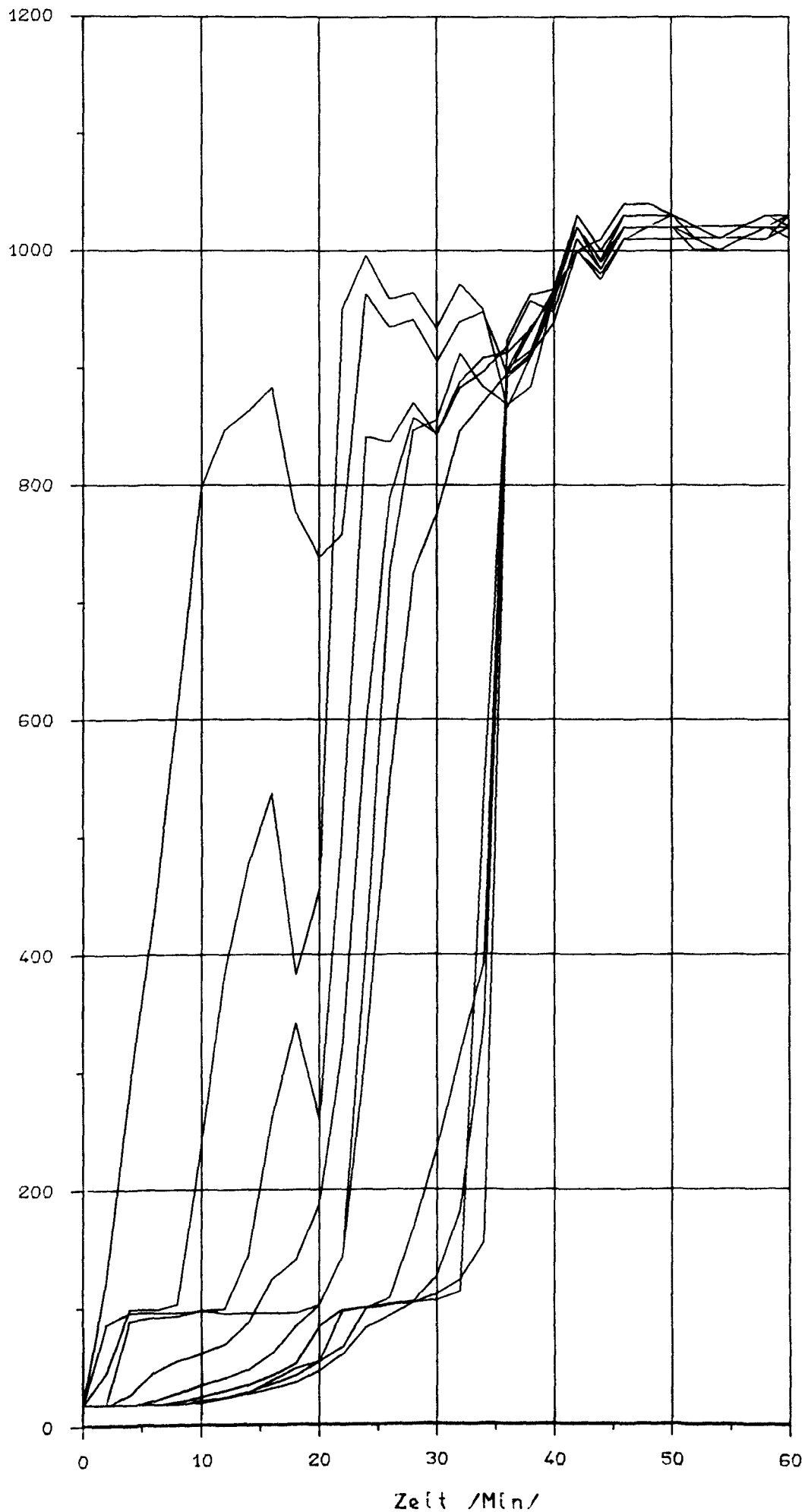


... 28
... 29
... 30
... 27

Anlage 5.3.3

Versuch - Nr.8, Mst.31-40

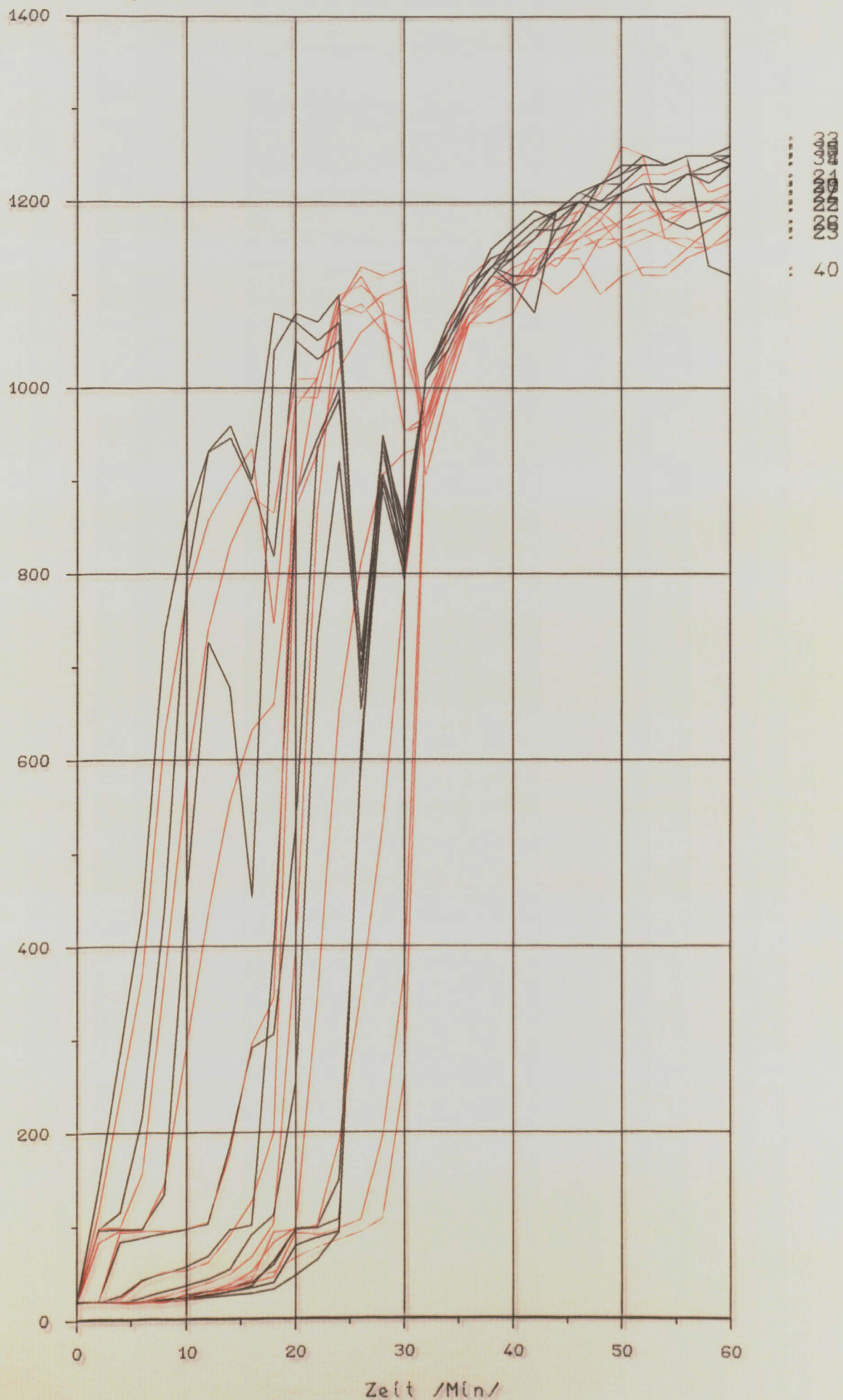
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.4.1

Versuch-Nr. 9, Mst. 21-30 (rot) Mst. 31-40 (schwarz)

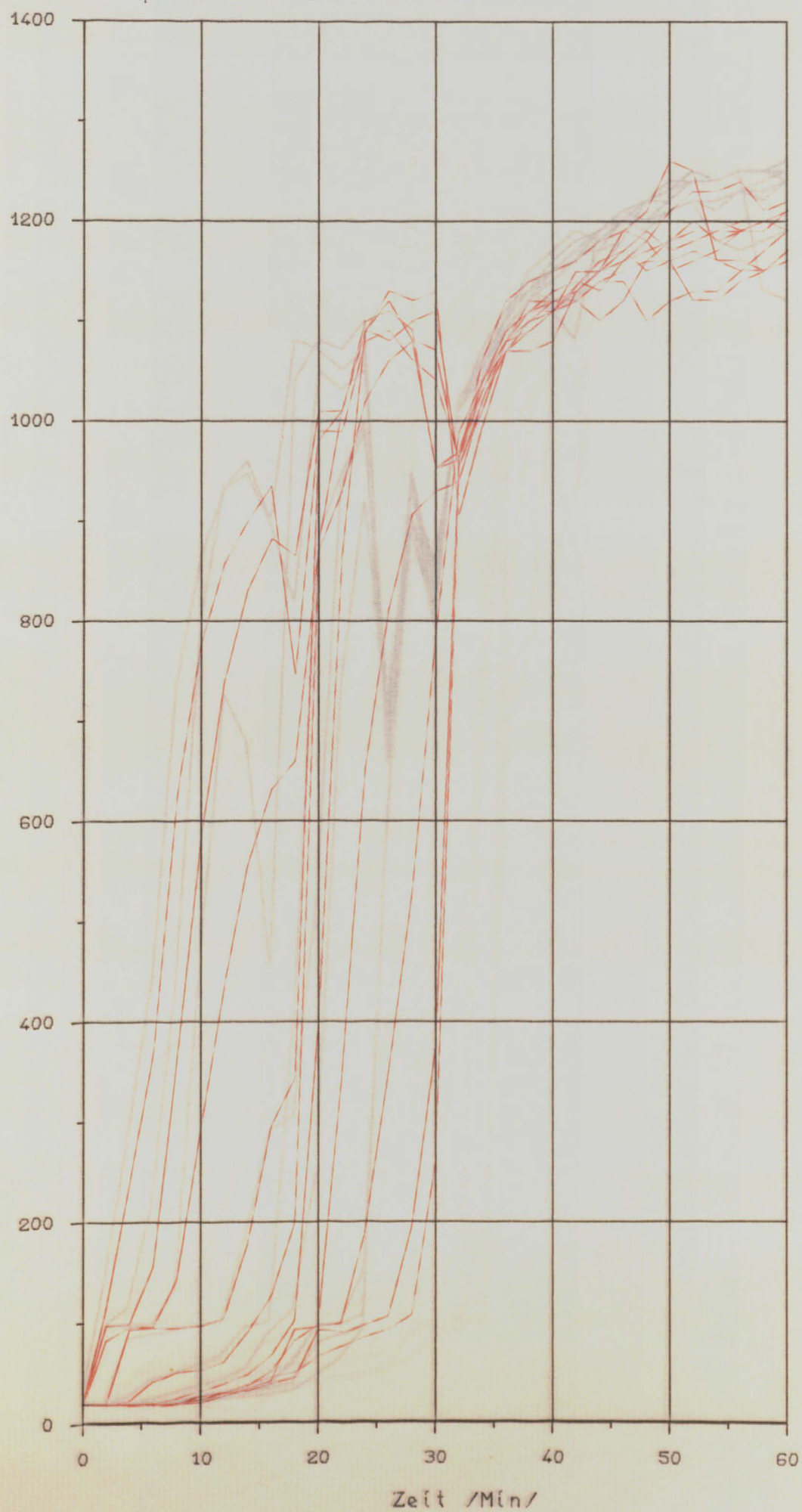
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.4.2

Versuch - Nr.9, Mst.21-30

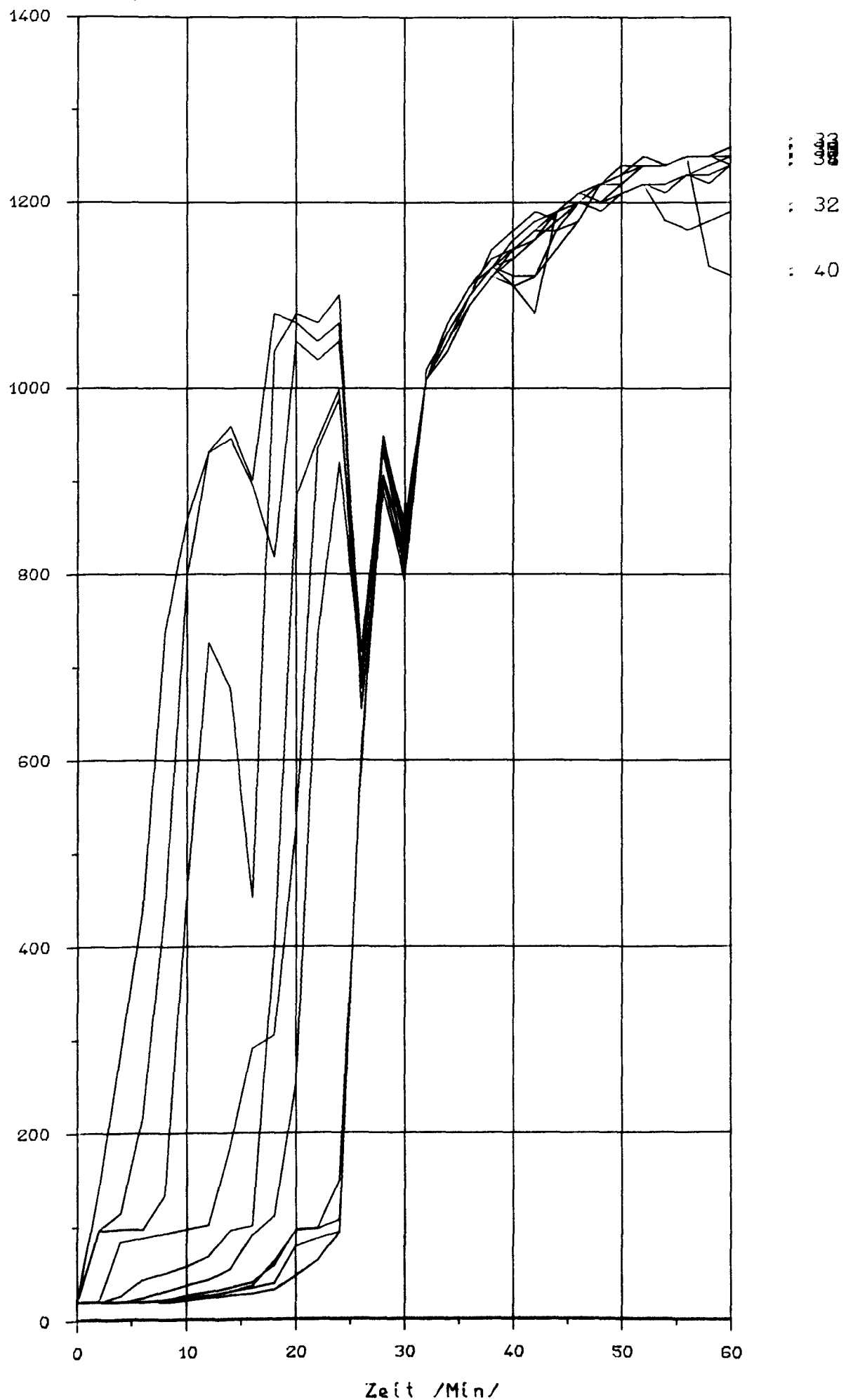
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.4.3

Versuch - Nr.9, Mst.31-40

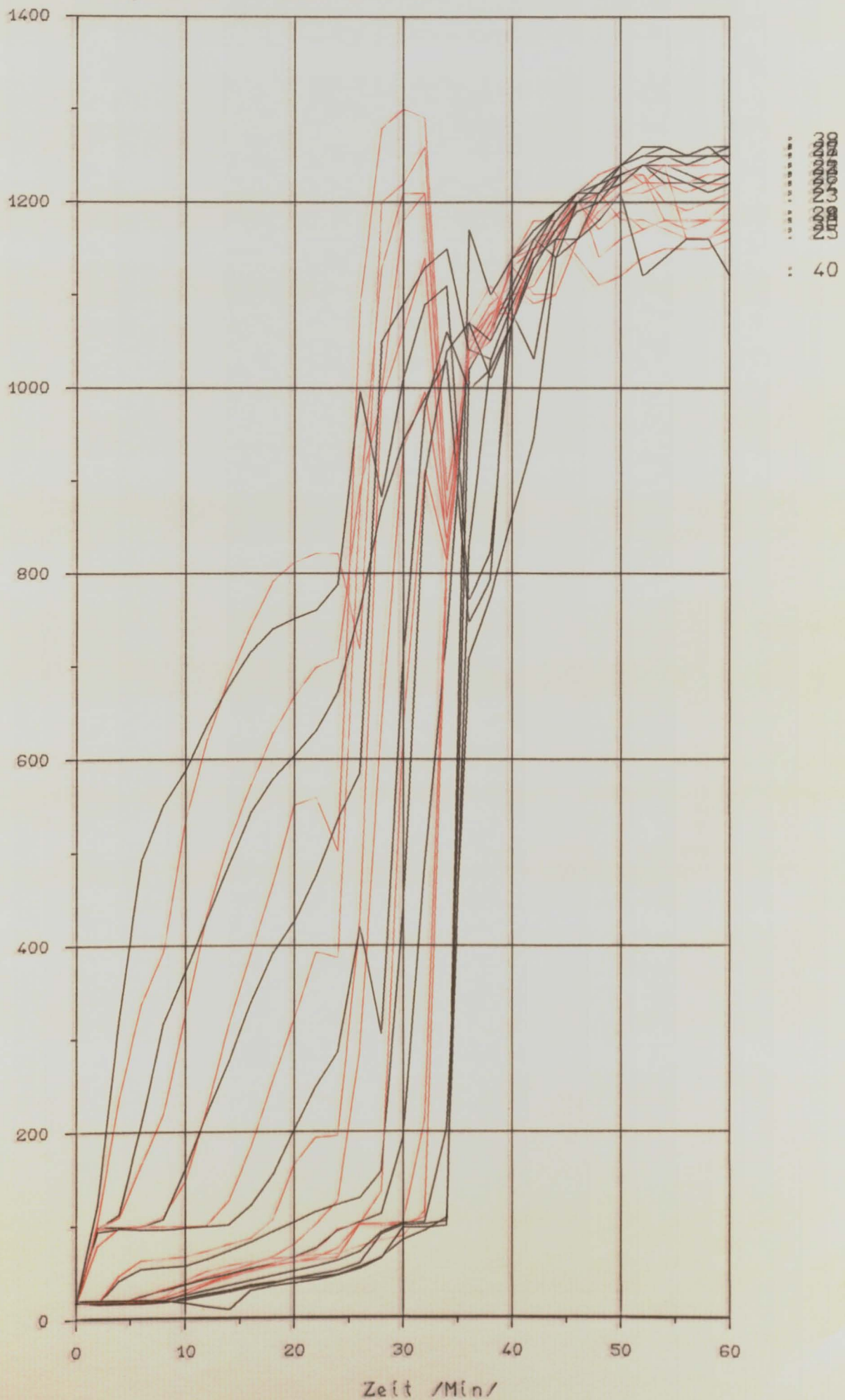
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.5.1

Versuch-Nr. 10, Mst. 21-30 (rot) Mst. 31-40 (schwarz)

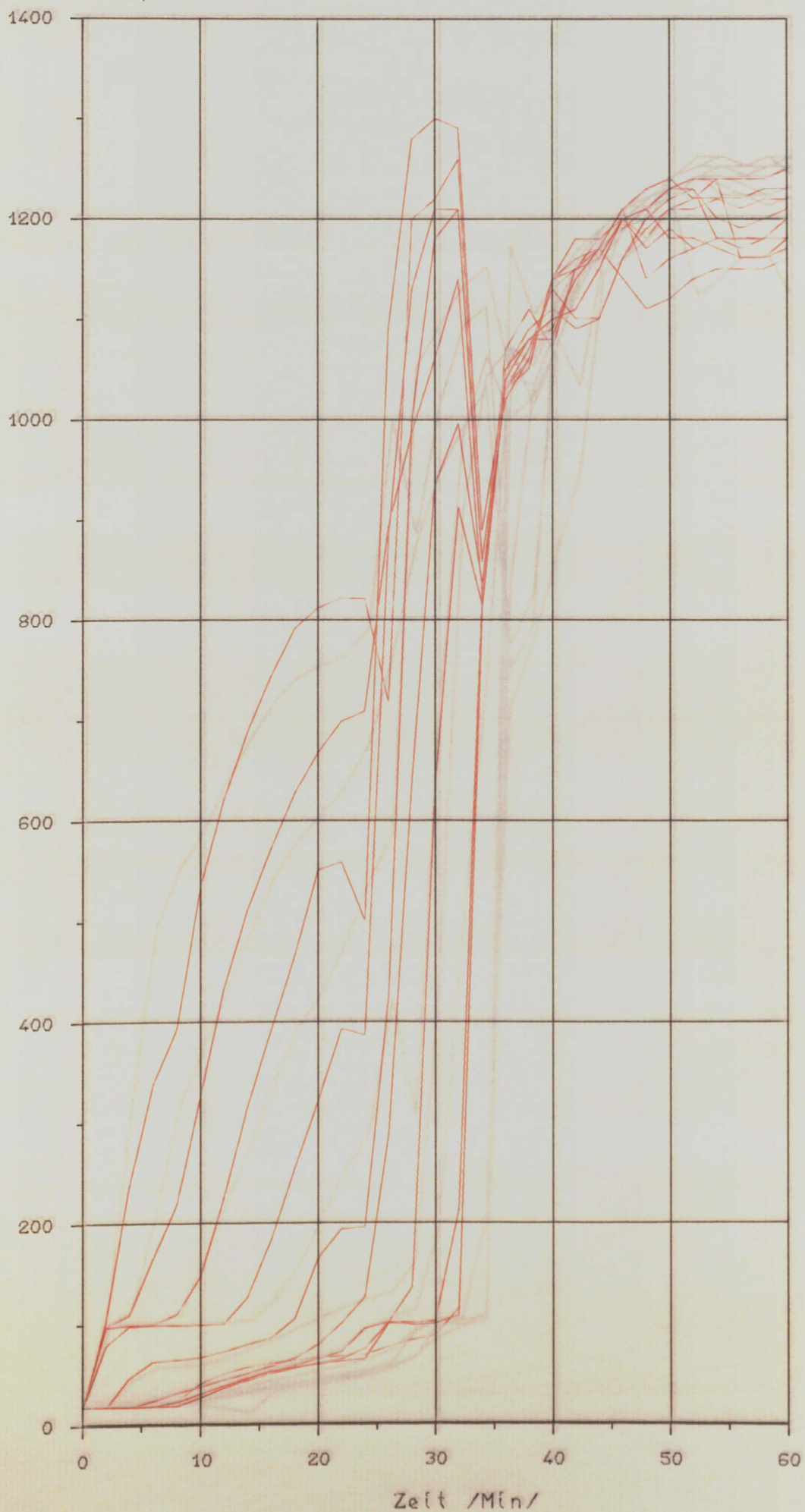
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.5.2

Versuch - Nr. 10, Mst. 21-30

Temperatur in Grad Celsius



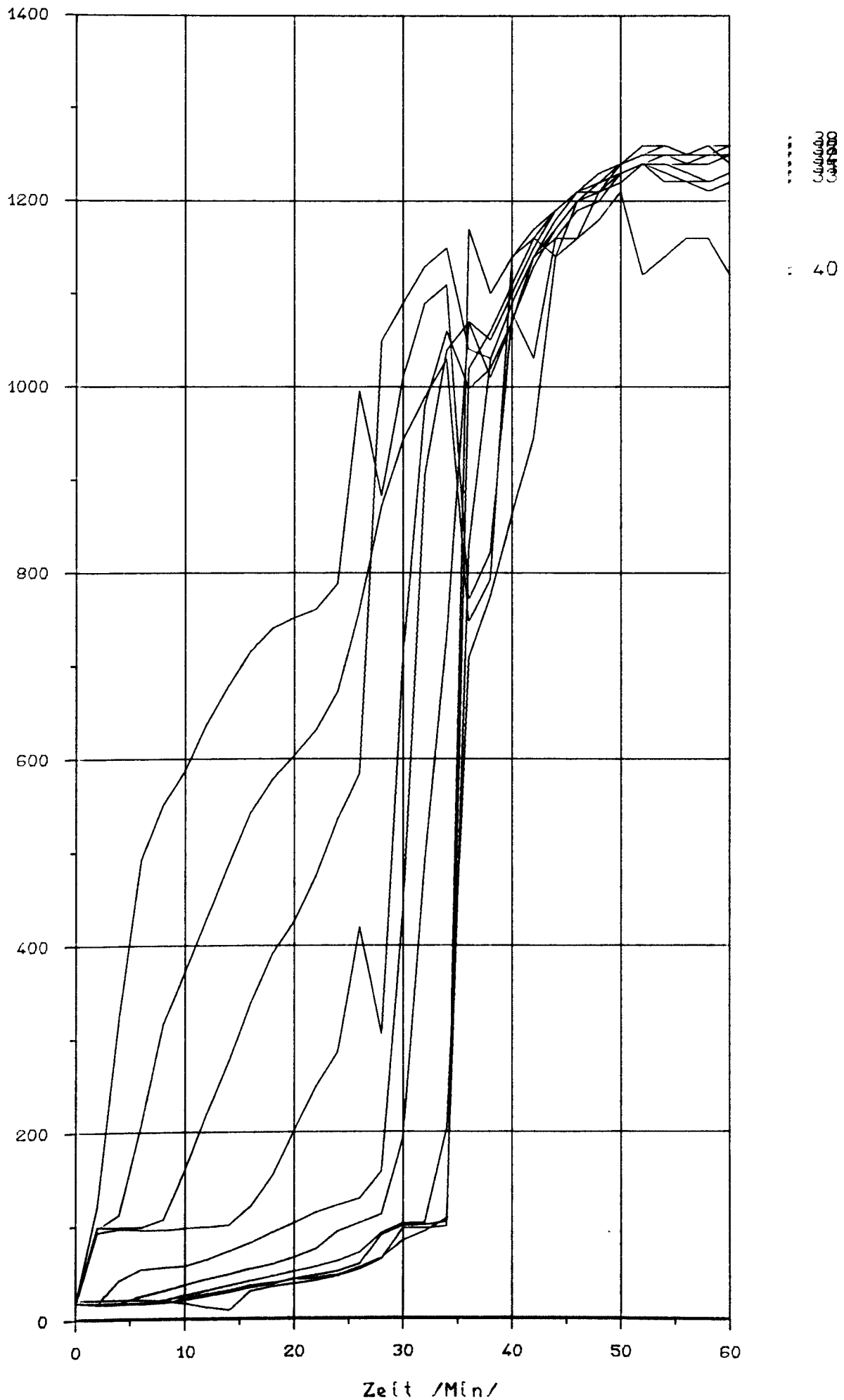
27
26
25
24
23
22
21
20
19
18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0

40

Anlage 5.5.3

Versuch - Nr. 10, Met. 31-40

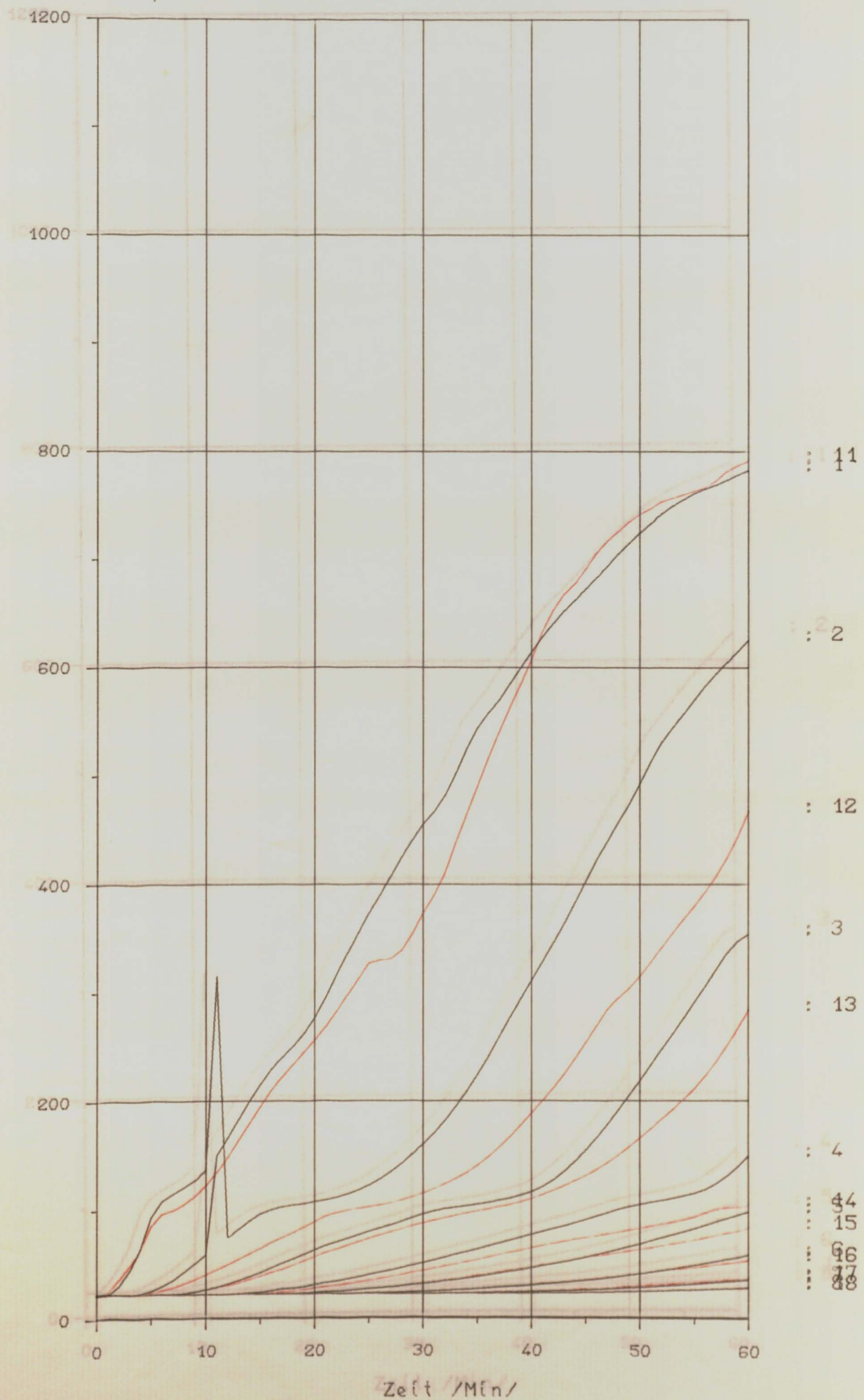
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 55.6.1

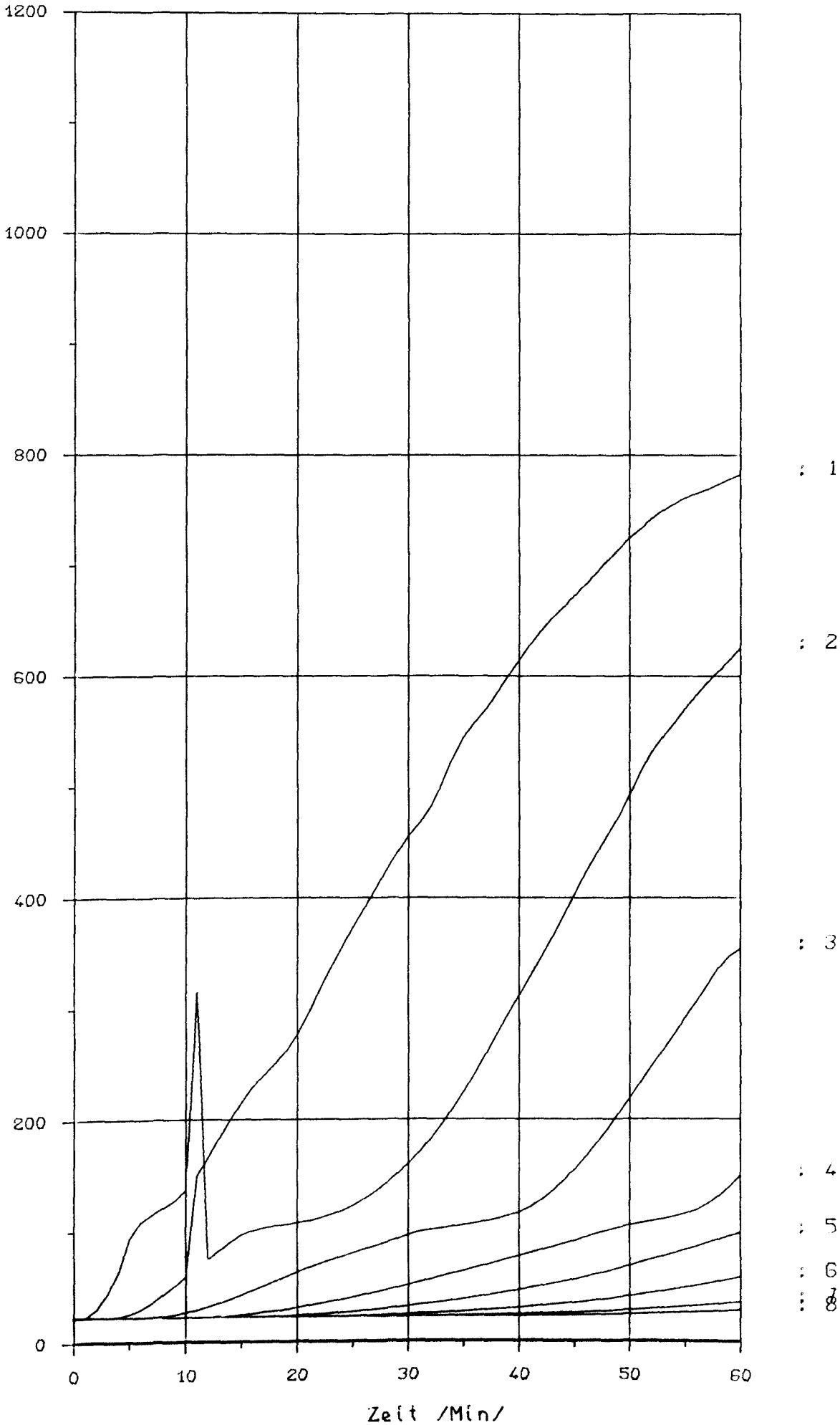
Versuch - Nr. 11, Mst. 1-8 (schwarz), 11-18 (rot)

Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.6.2
Versuch - Nr. 11, Mst. 1-8

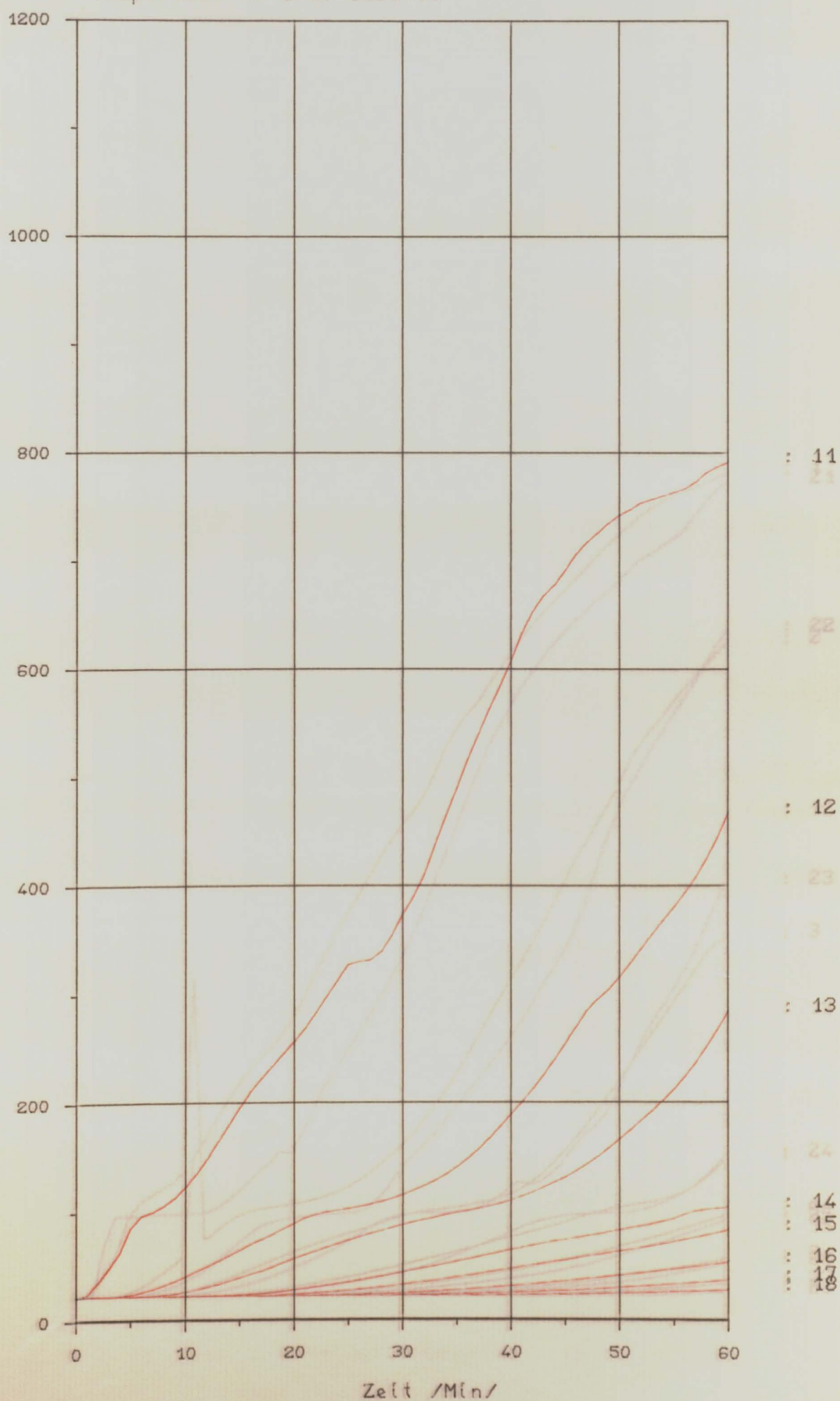
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.6.3 Versuch - Nr. 11

Versuch - Nr. 11 Mst. 11-18 (rot) Mst. 21-28 (blau)

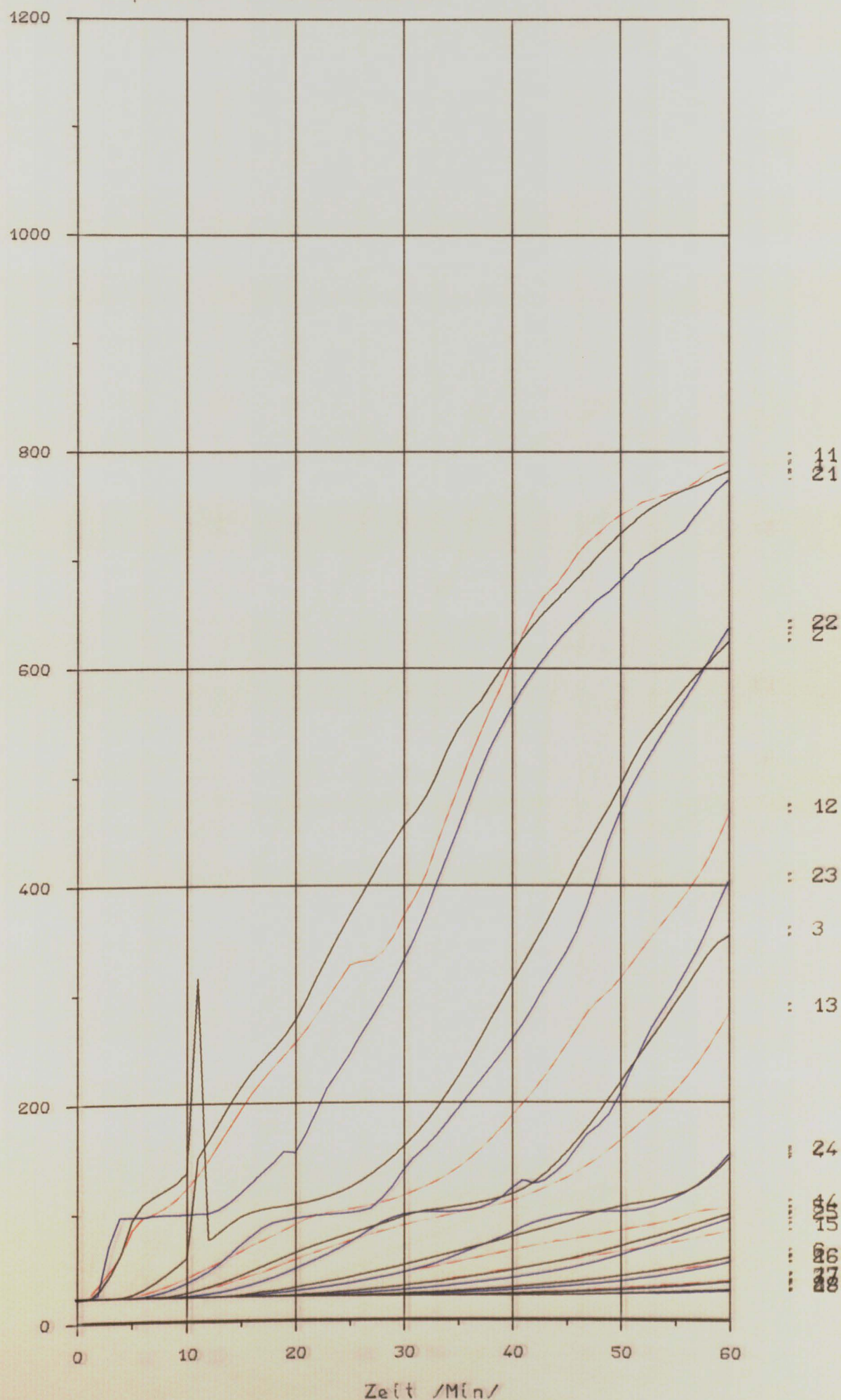
Temperatur in Grad Celsius



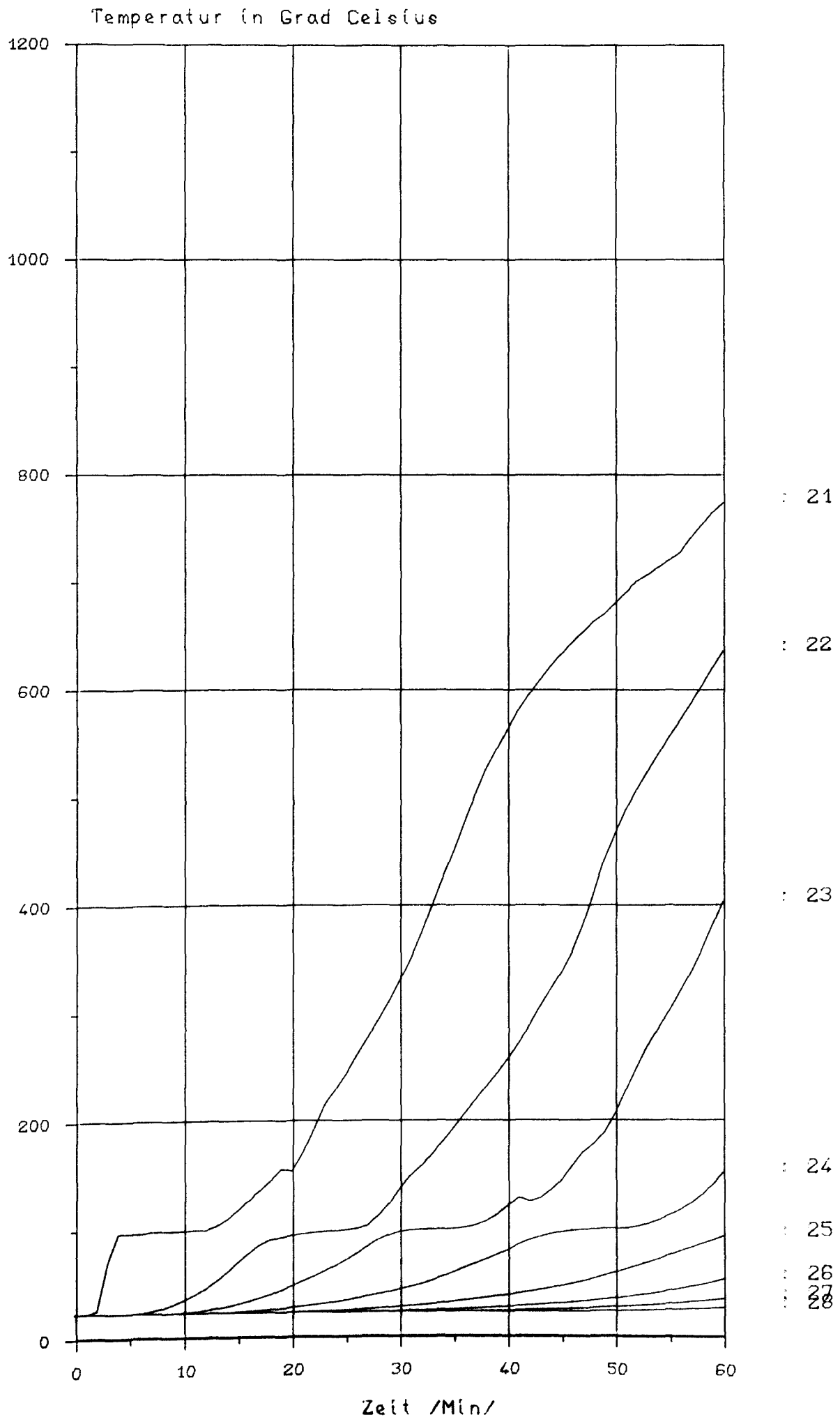
Anlage 5.6.4 Versuch - Nr. 11

Mst. 1-8 (schwarz) Mst. 11-18 (rot) Mst. 21-28 (blau)

Temperatur in Grad Celsius



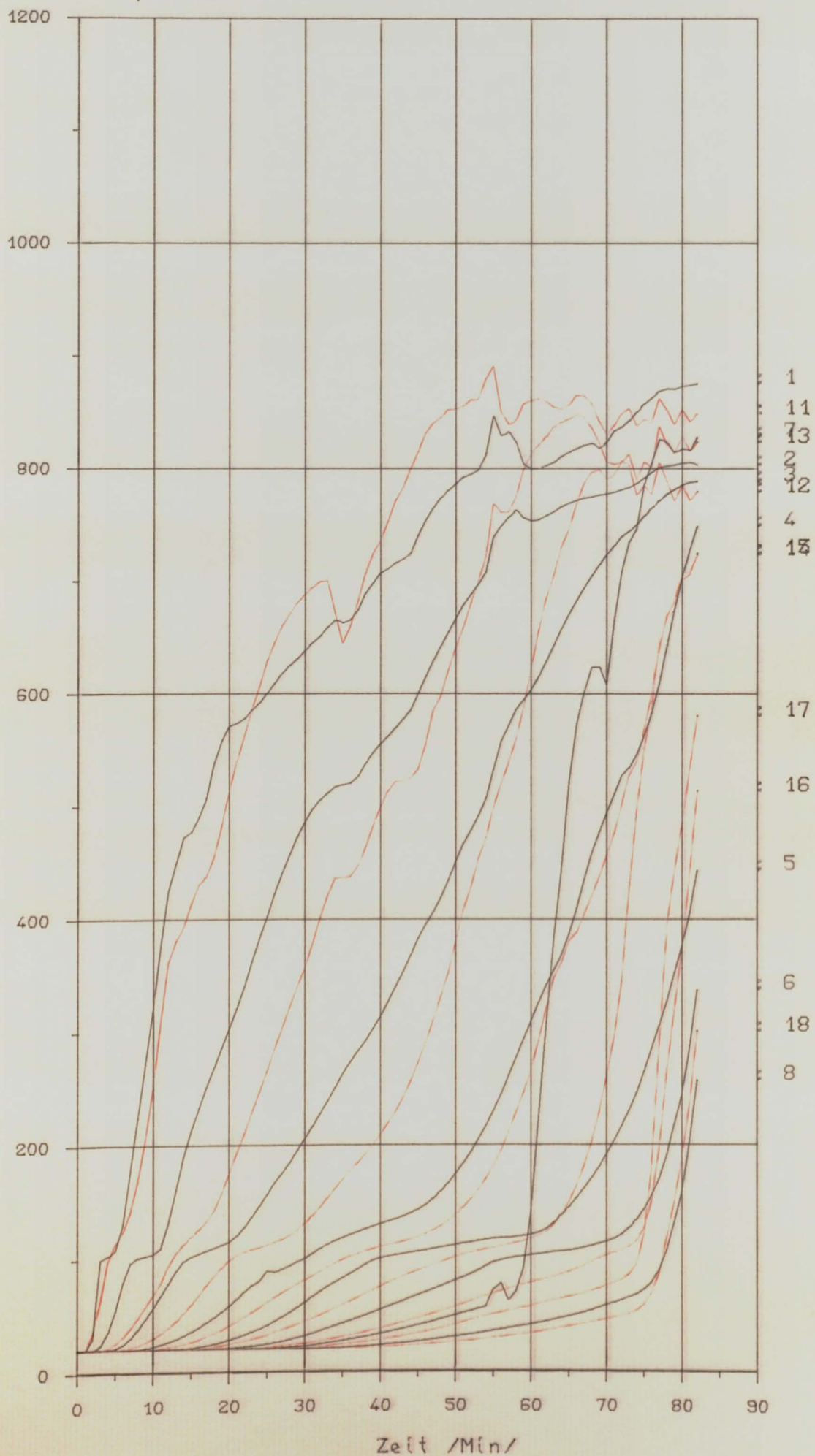
Anlage 5.6.5
Versuch - Nr.11,Mst.21-28



Anlage 5.7.1

Versuch-Nr. 12, Mst. 1-8 (schwarz), Mst. 11-18 (rot)

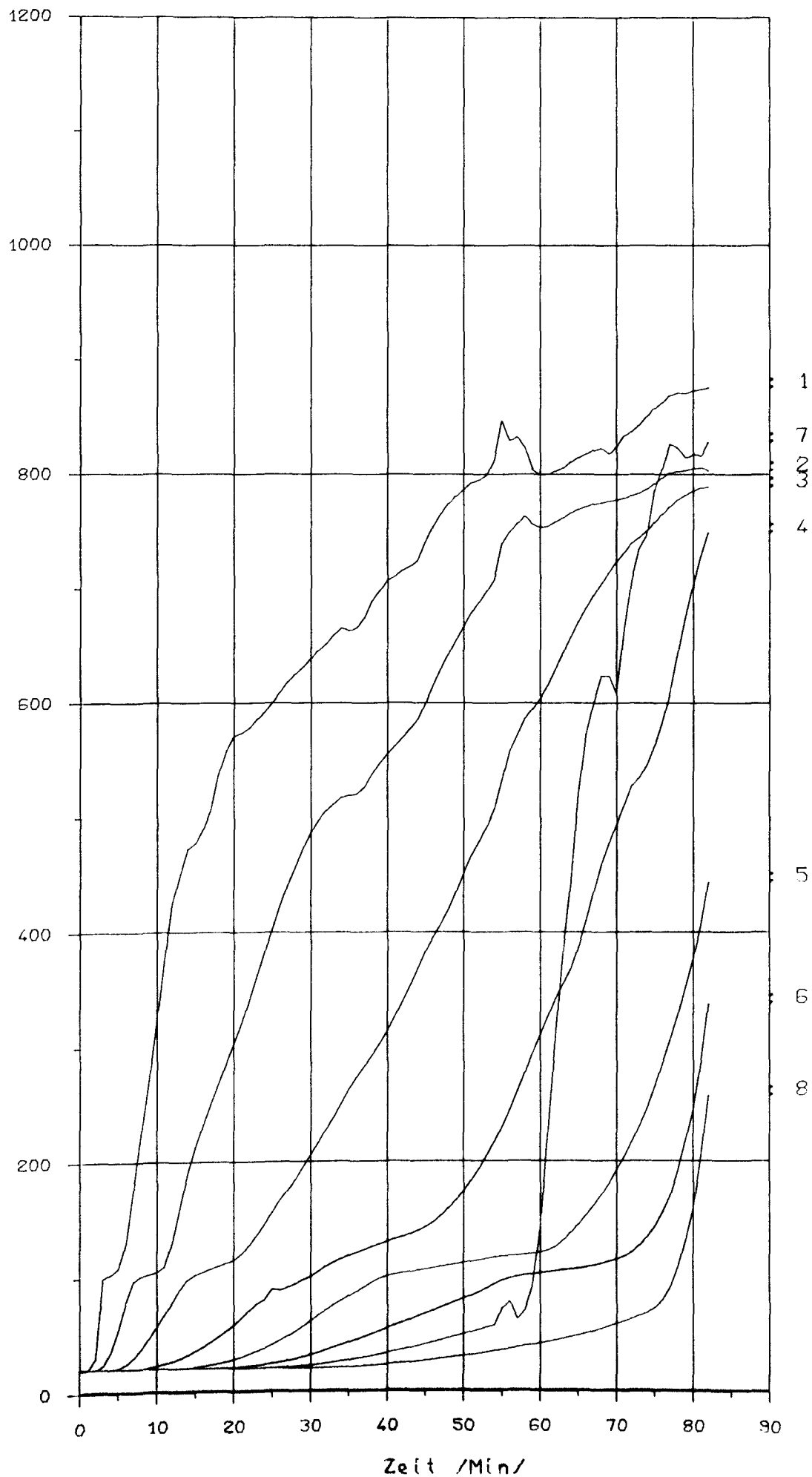
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.7.2

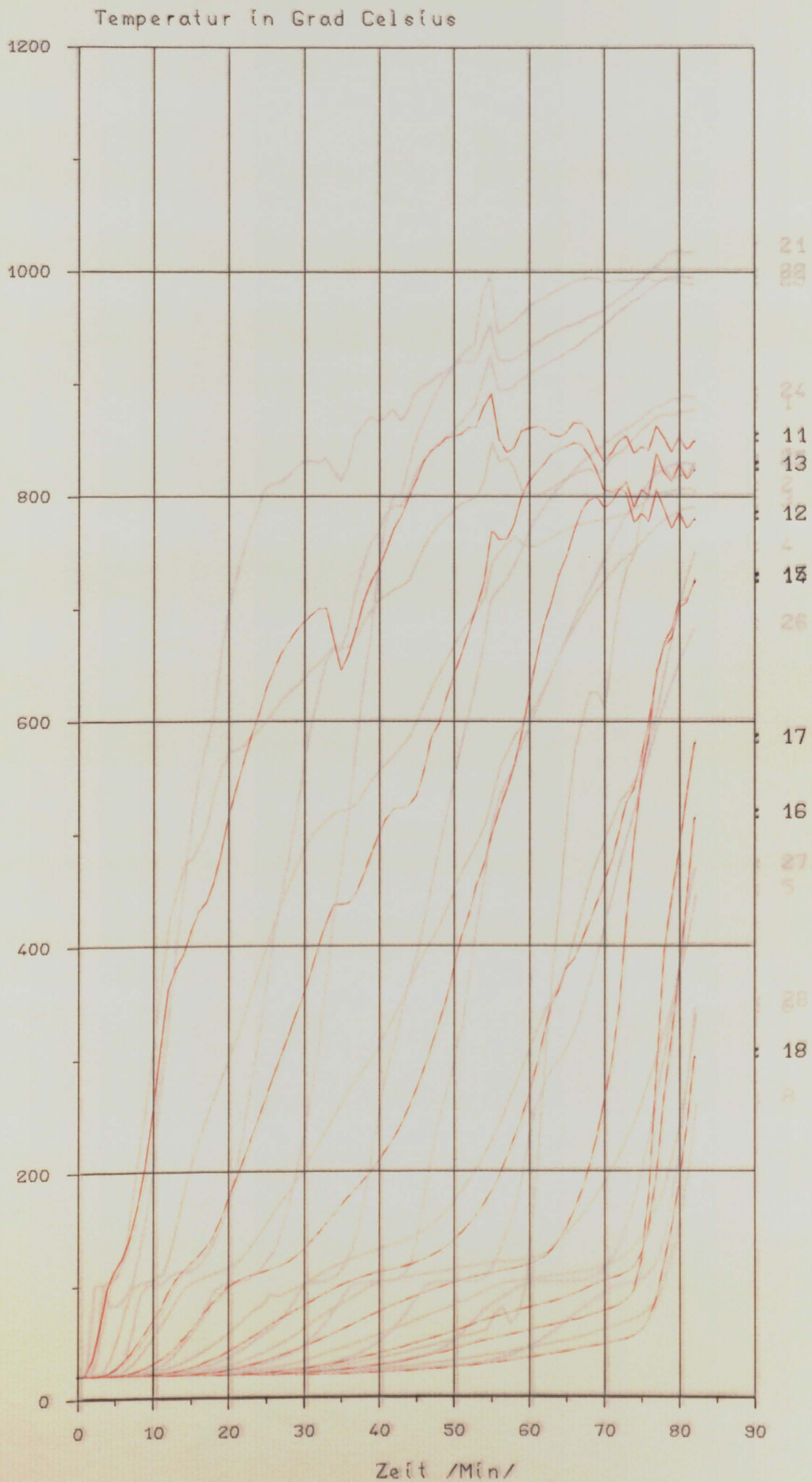
Versuch - Nr. 12, Mst. 1-8

Temperatur in Grad Celsius



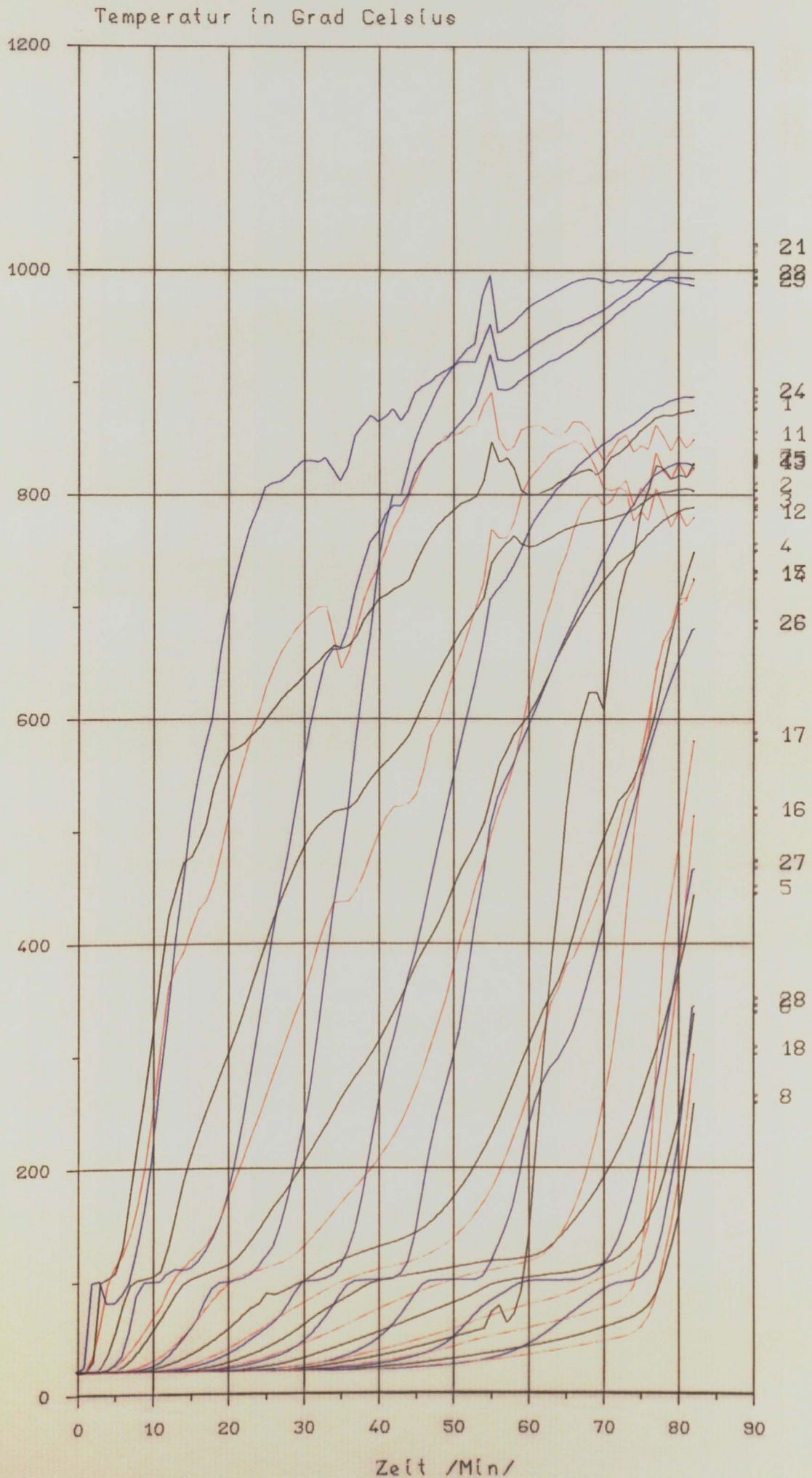
Anlage 5.7.3 Versuch - 12

Versuch(-e) Nr. 12 Mst. 11-18 (rot) Mst. 21-28 (blau)



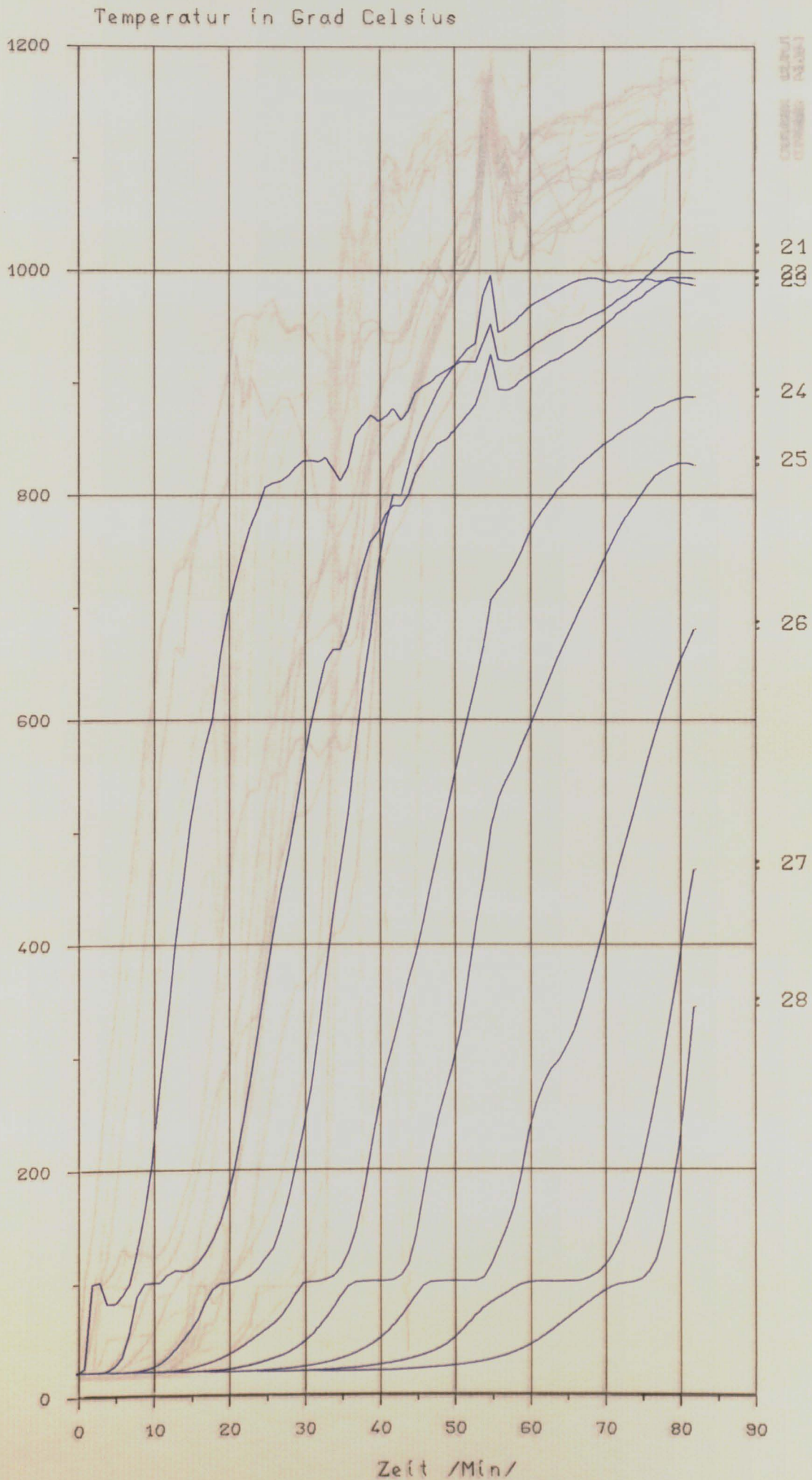
Anlage 5.7.4 Versuch - 12

Mst. 1-8 (schwarz) Mst. 11-18 (rot) Mst. 21-28 (blau)



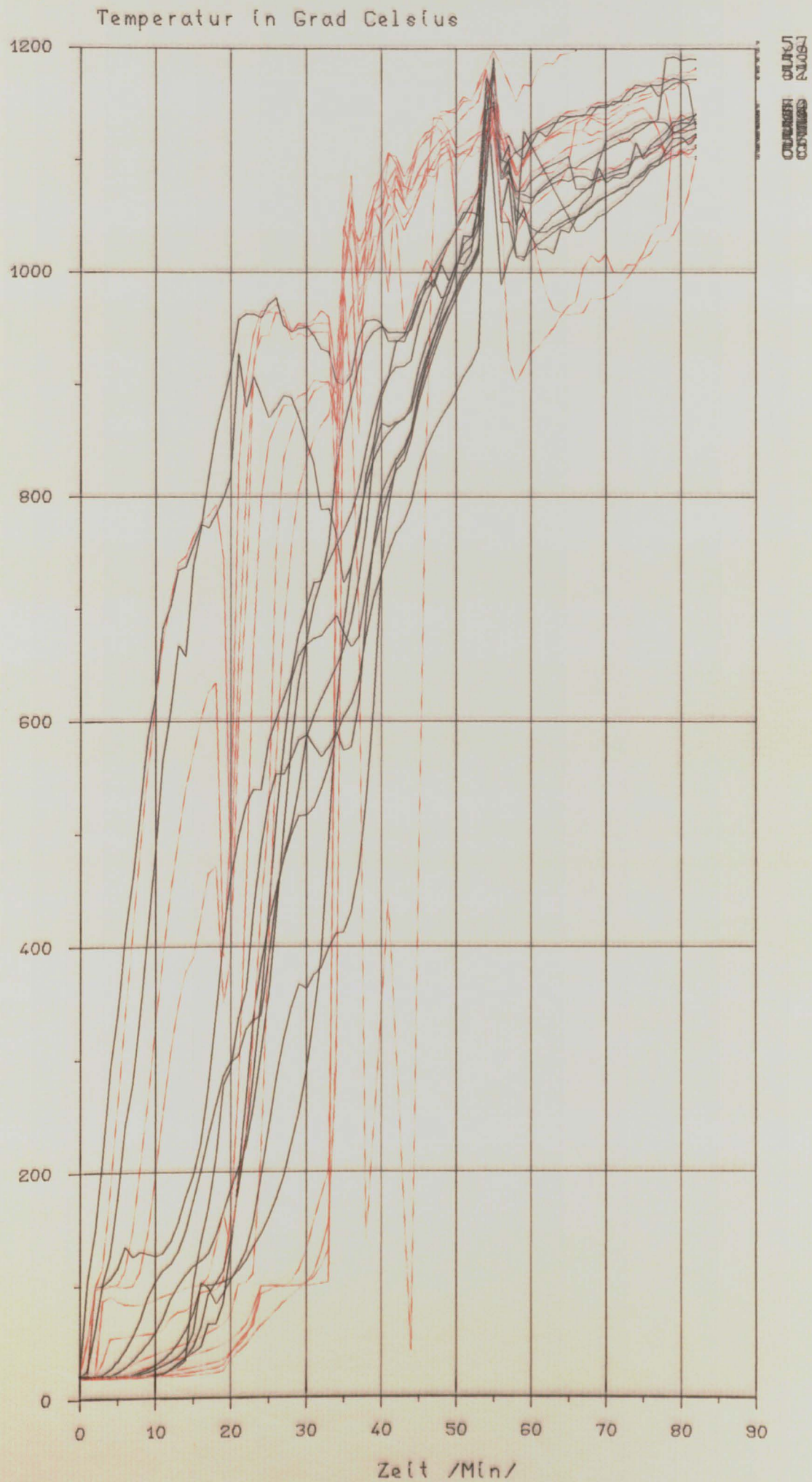
Anlage 5.7.5

Versuch-Nr. 12, Mst. 21-28 (schwarz) Met. 51-60 (rot)



Anlage 5.7.6

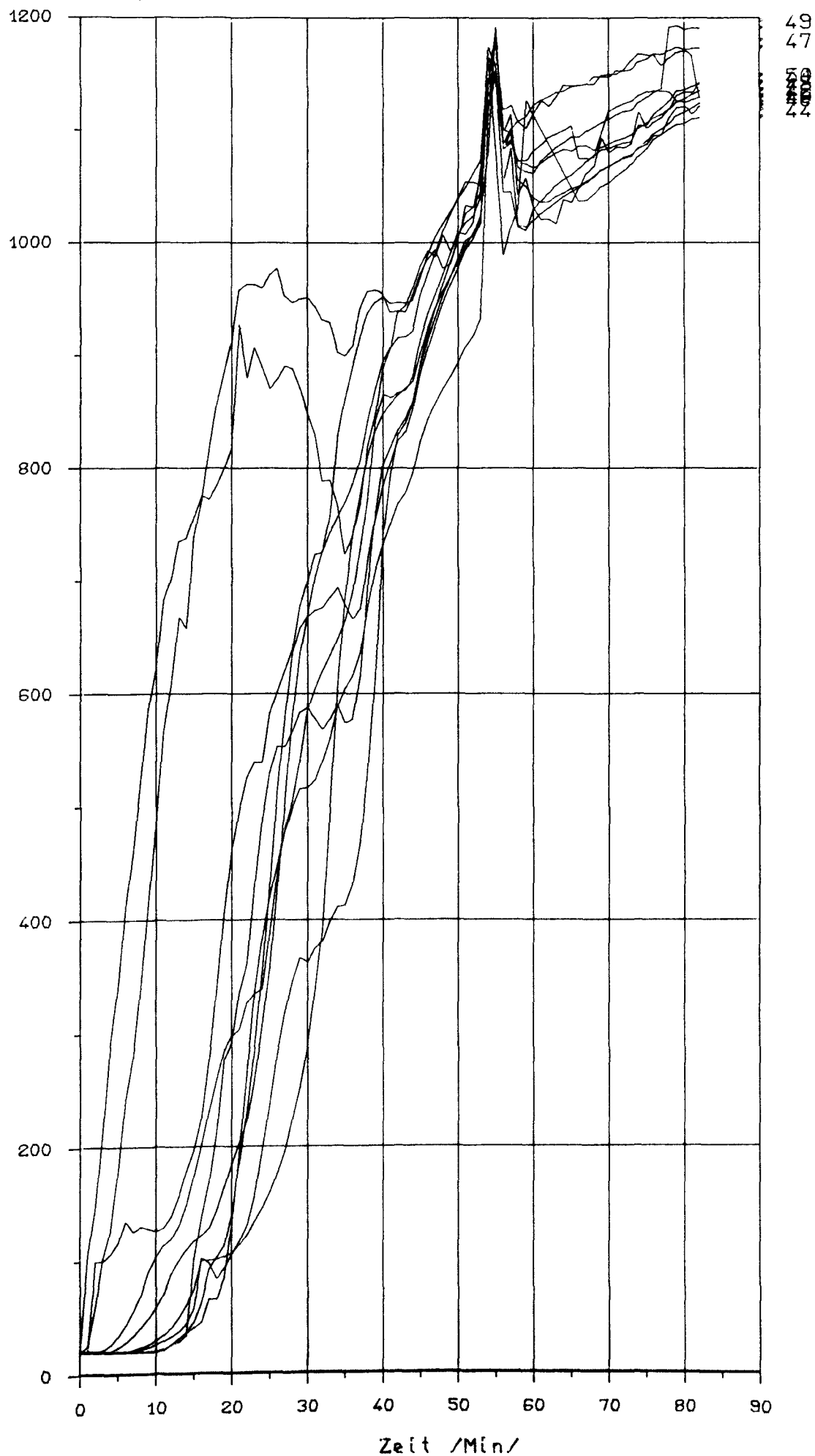
Versuch-Nr. 12, Mst. 41-50 (schwarz) Mst. 51-60 (rot)



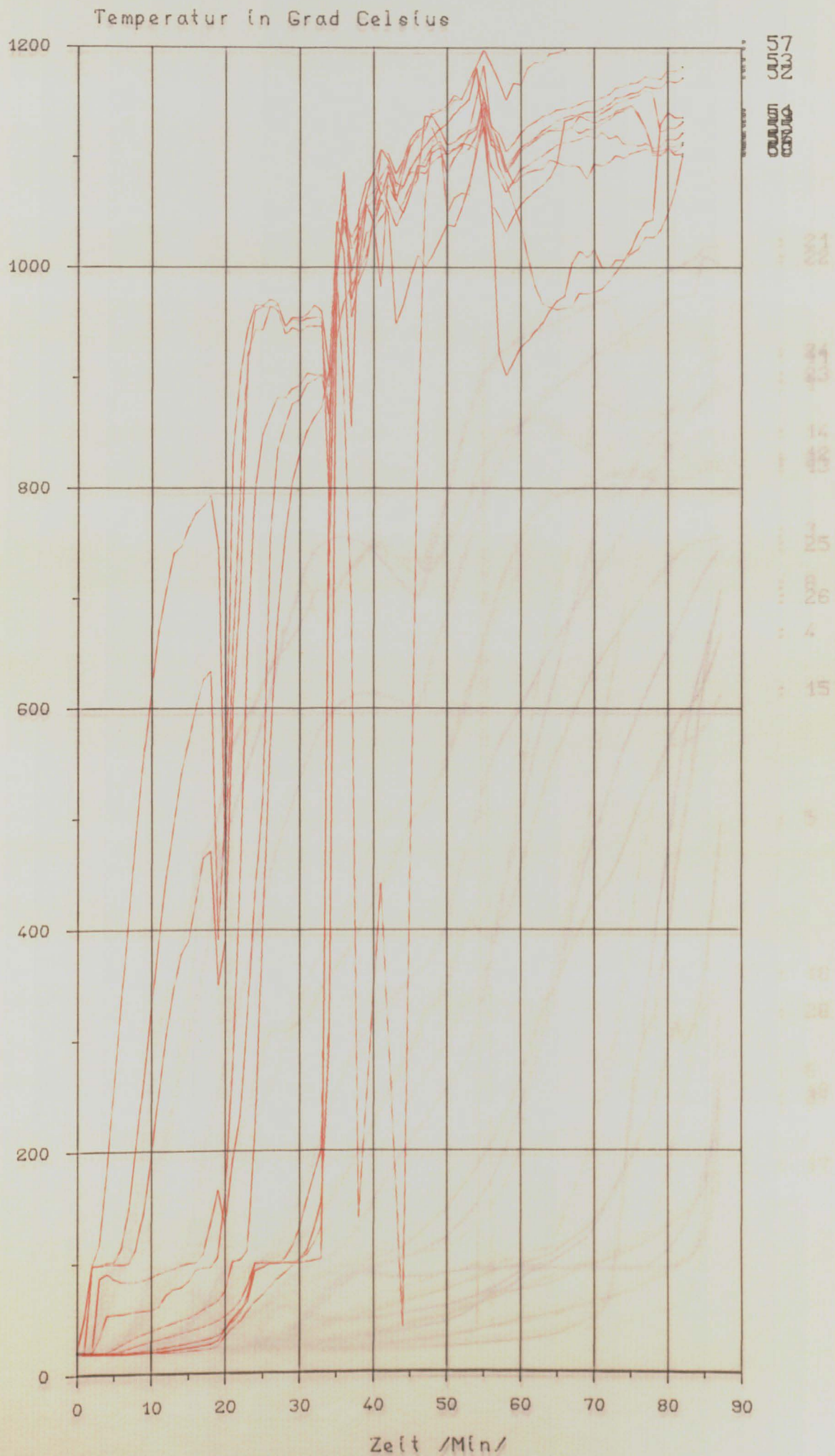
Anlage 5.7.7

Versuch - Nr. 12, Mst. 41-50

Temperatur in Grad Celsius



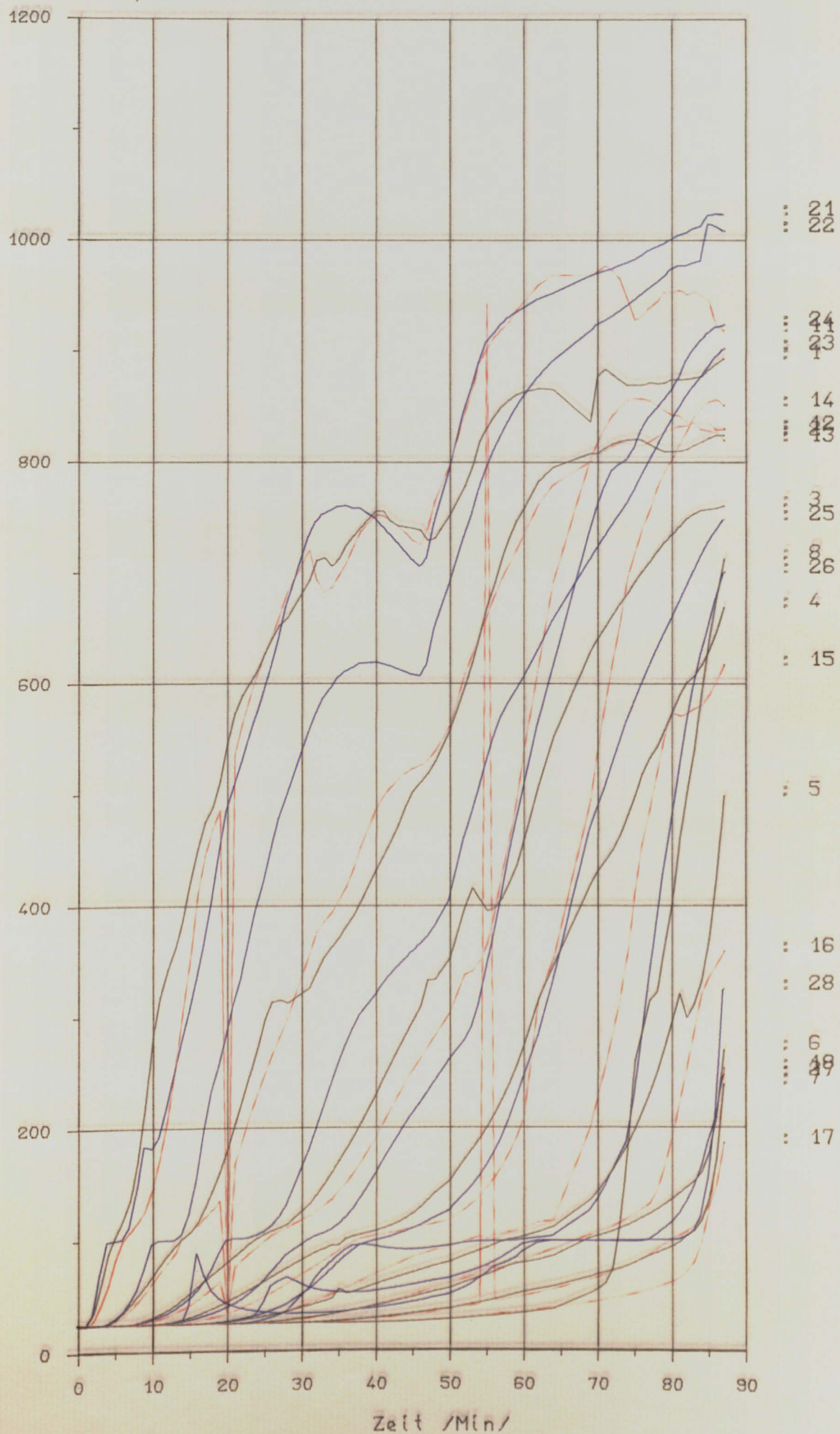
Anlage 5.7.8 Versuch - Nr. 13
 Versuch - Nr. 12, Mst. 51-60 (rot) Mst. 21-28 (blau)



Anlage 5.8.1 Versuch - Nr.13

Mst. 1-8 (schwarz) Mst. 11-18 (rot) Mst. 21-28 (blau)

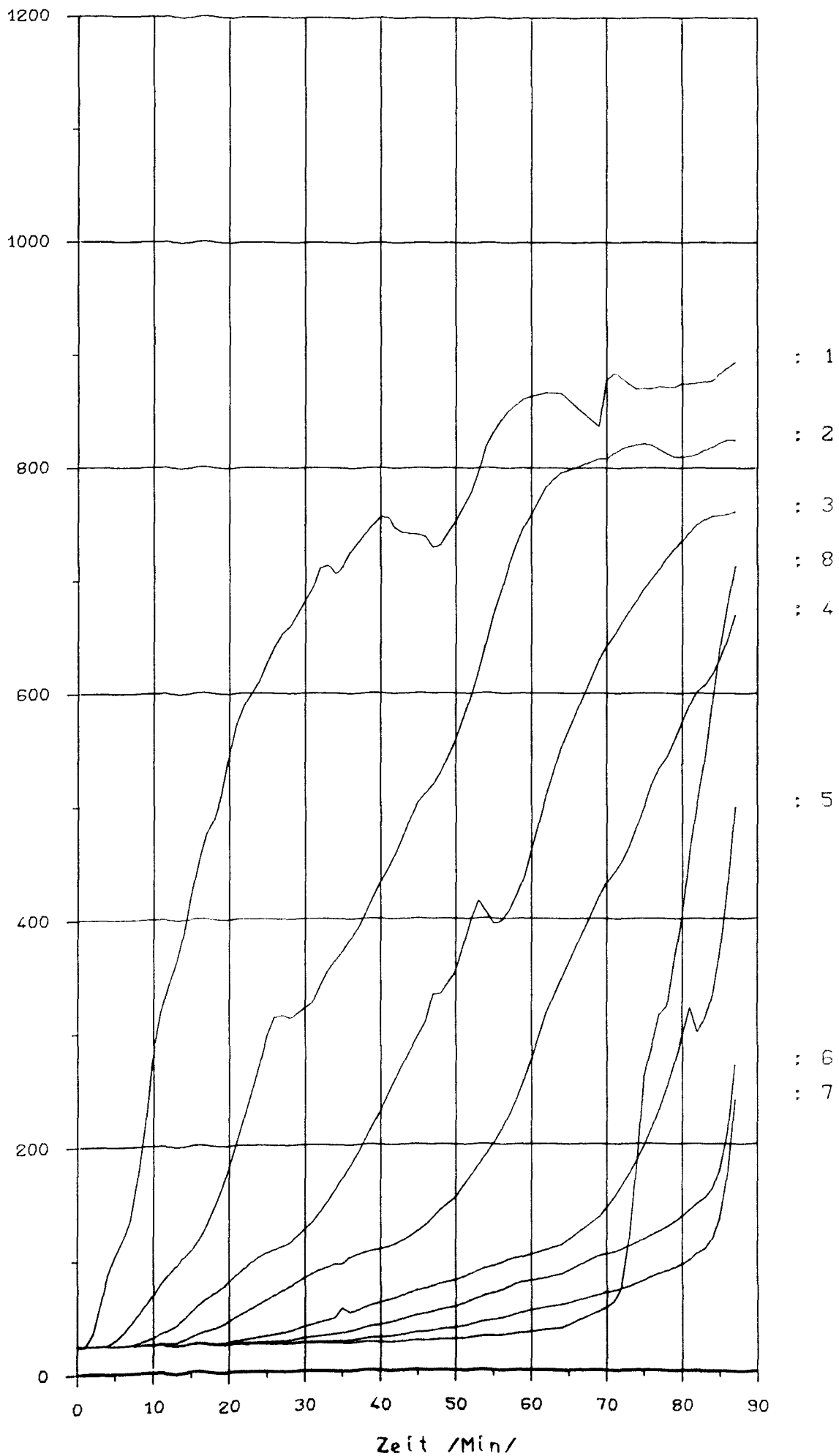
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.8.2

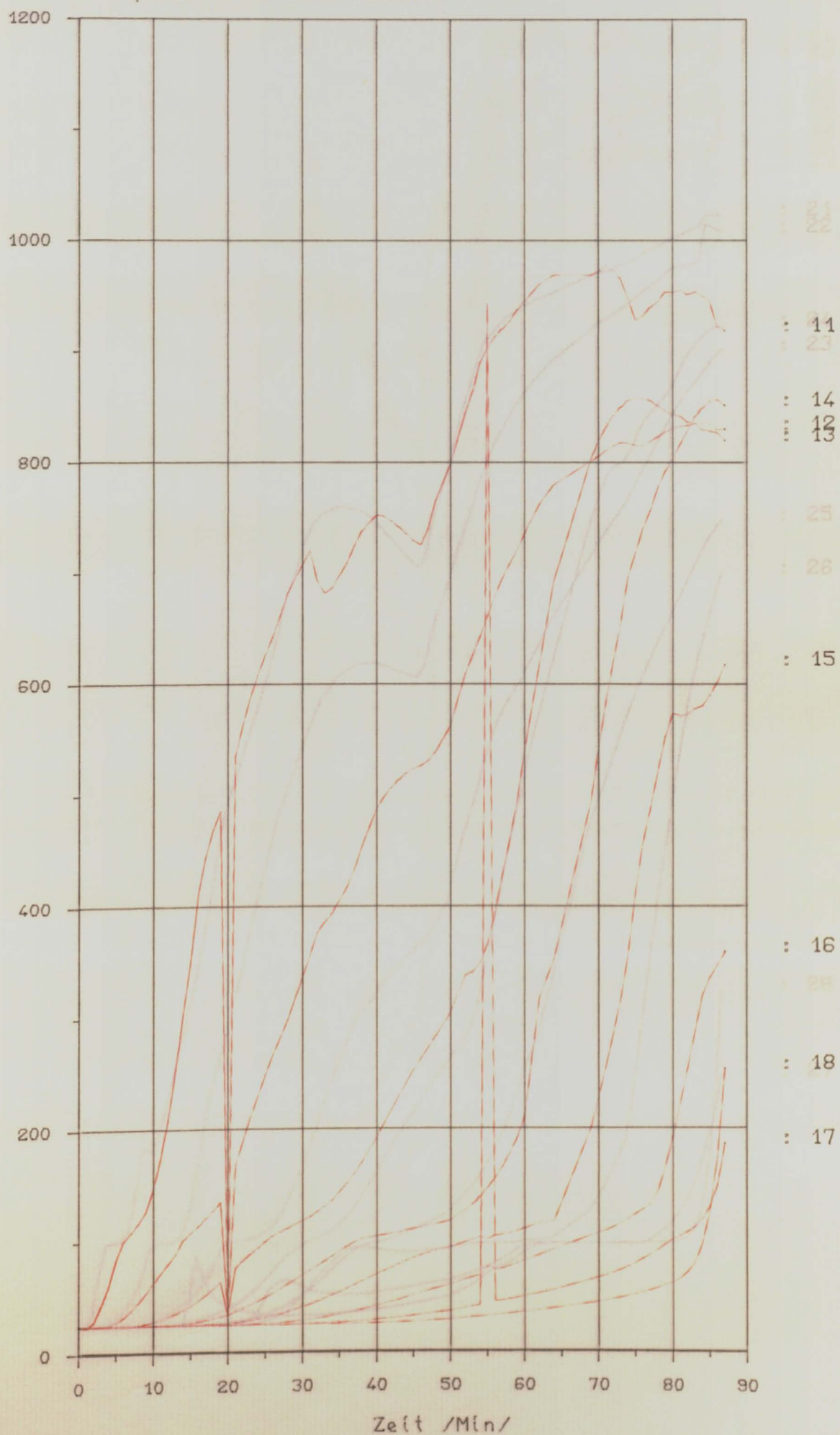
Versuch - Nr. 13, Mst. 1-8

Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.8.3 .
Versuch - Nr. 13, Mst. 11-18

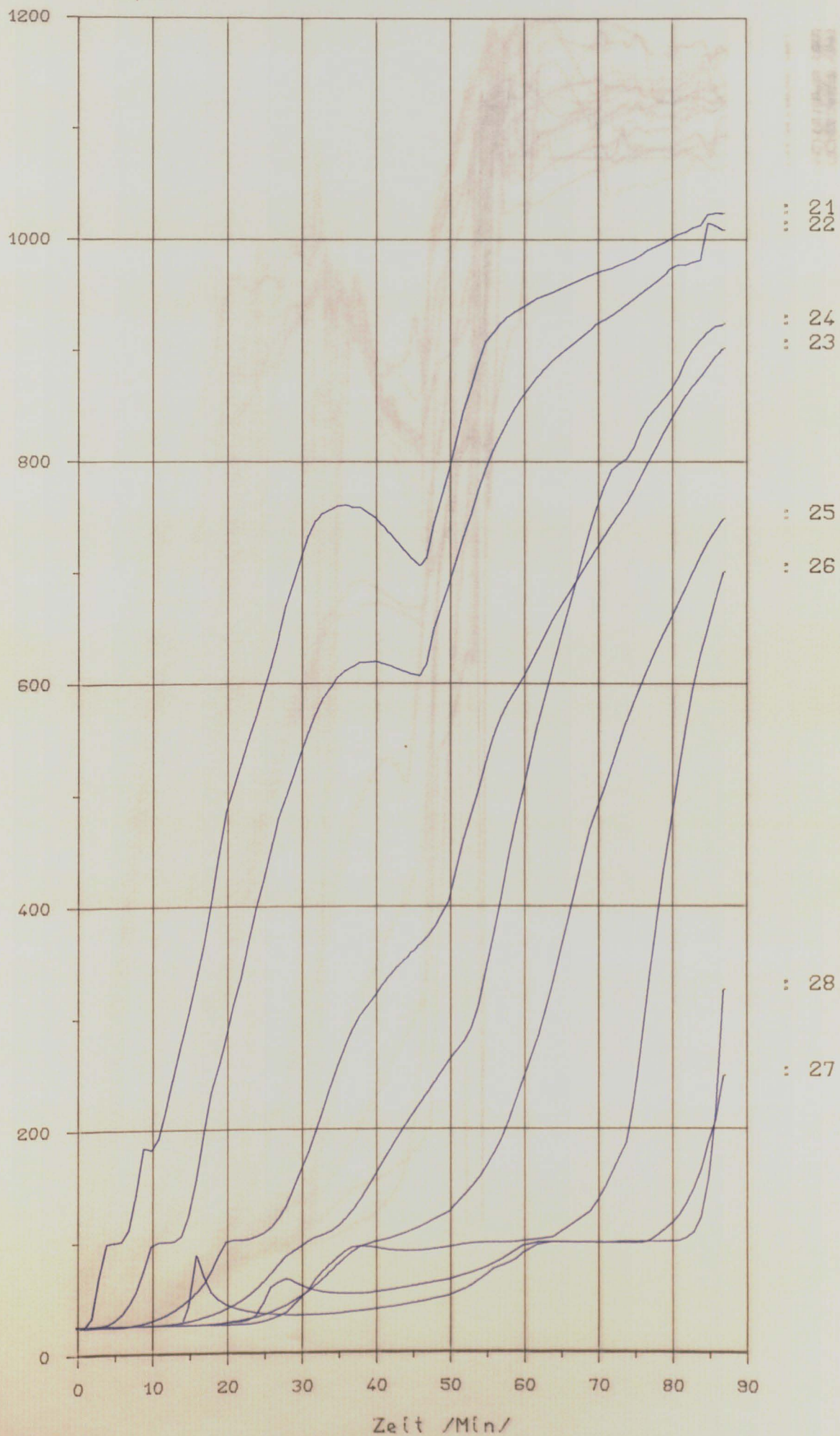
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.8.4

Versuch - Nr. 13, Mst. 21-28

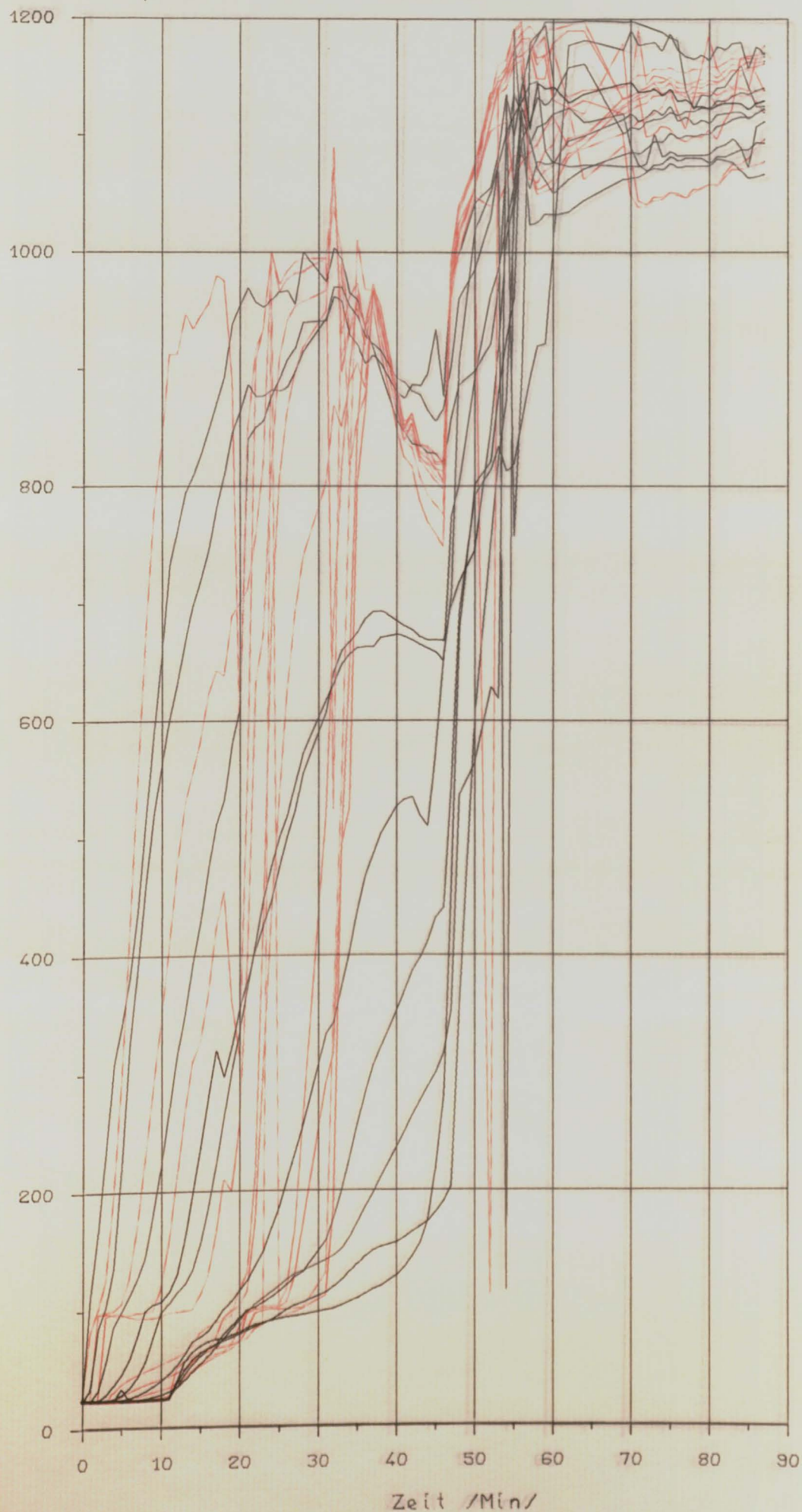
Temperatur in Grad Celsius



Anlage 5.8.5

Versuch-Nr. 13, Mst. 51-60 (rot) Mst. 41-50 (schwarz)

Temperatur in Grad Celsius

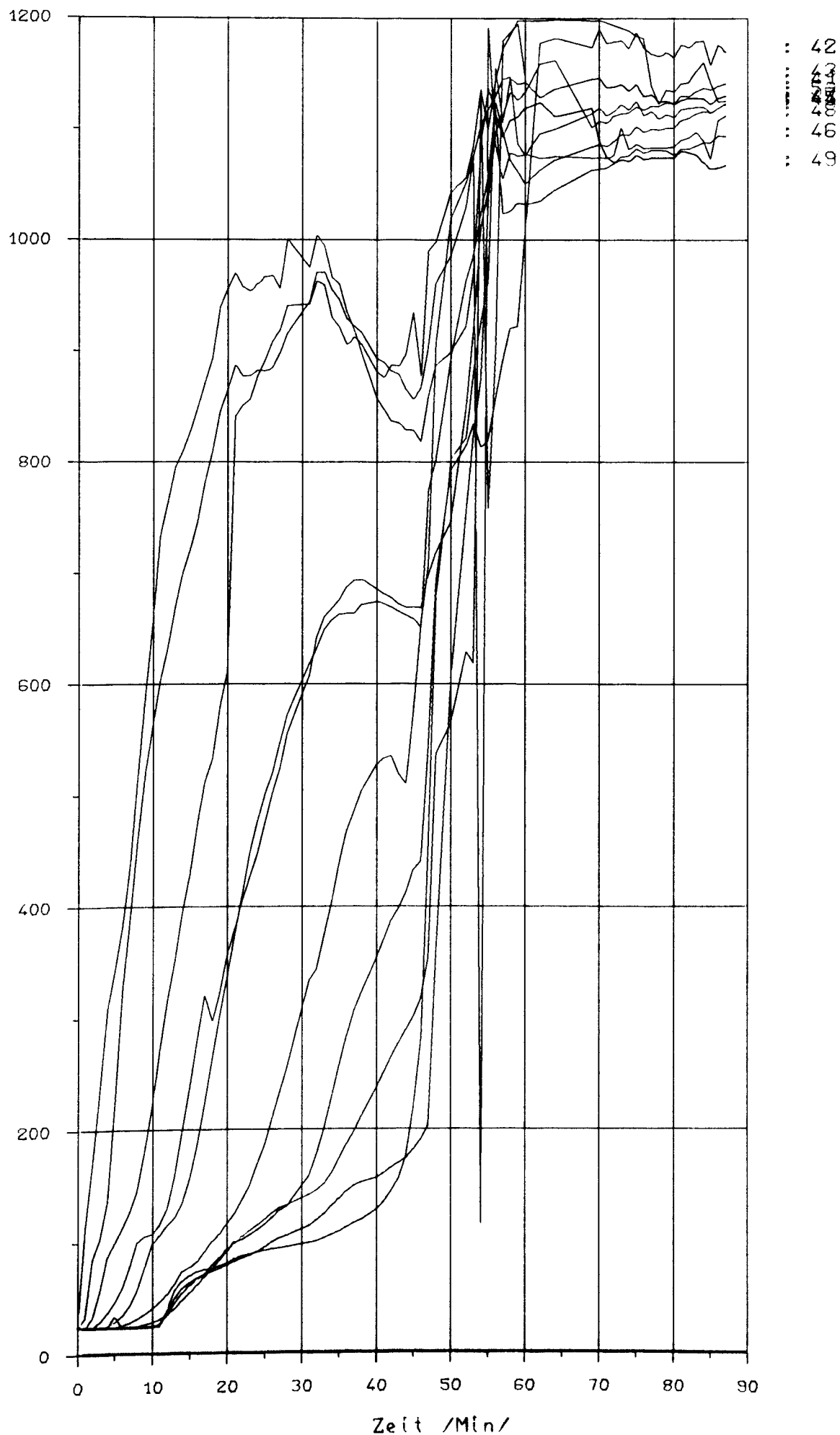


Temperatur in Grad Celsius
Zeit /Min/

Anlage 5.8.6

Versuch - Nr. 13, Mst. 41-50

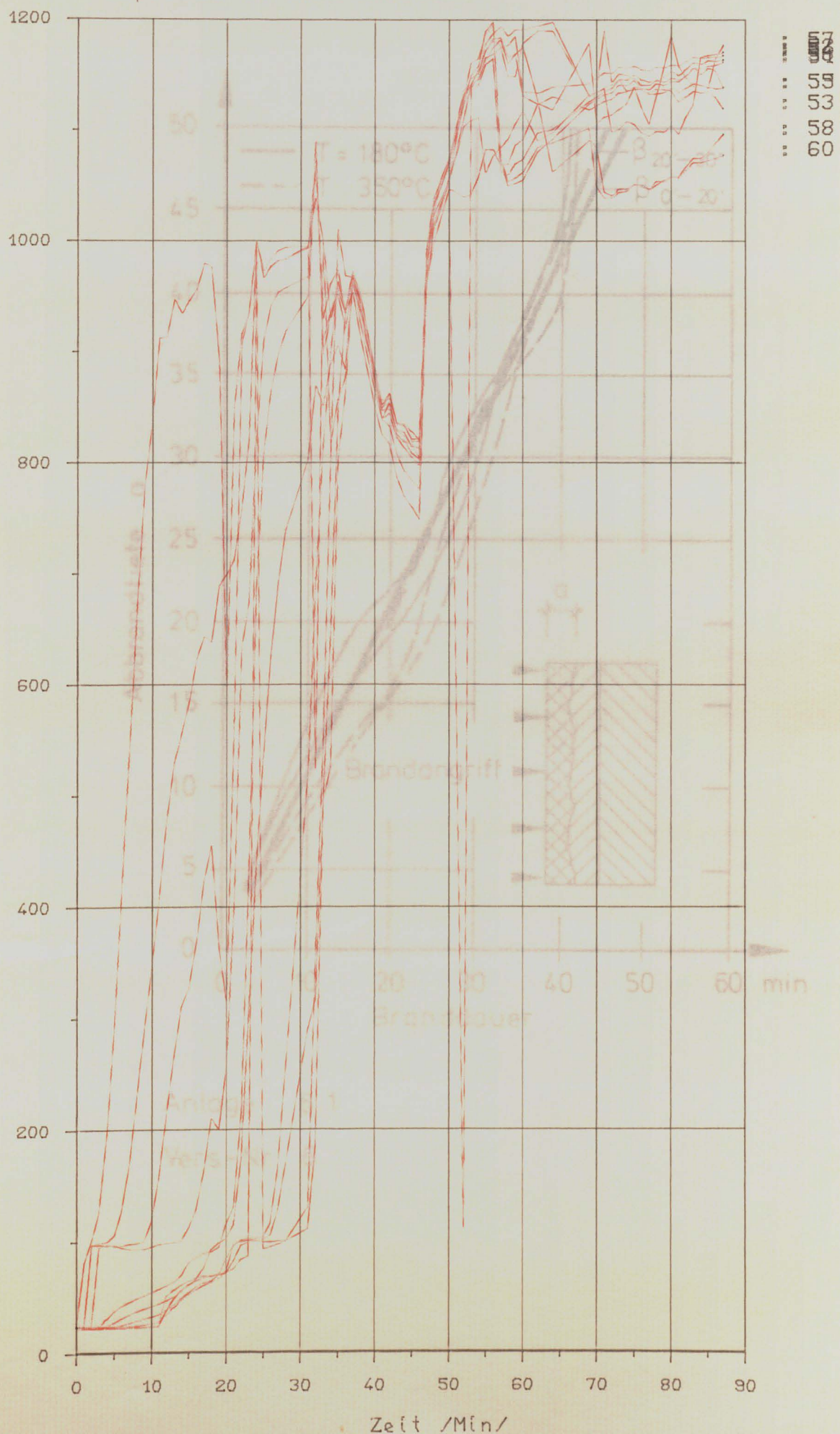
Temperatur in Grad Celsius

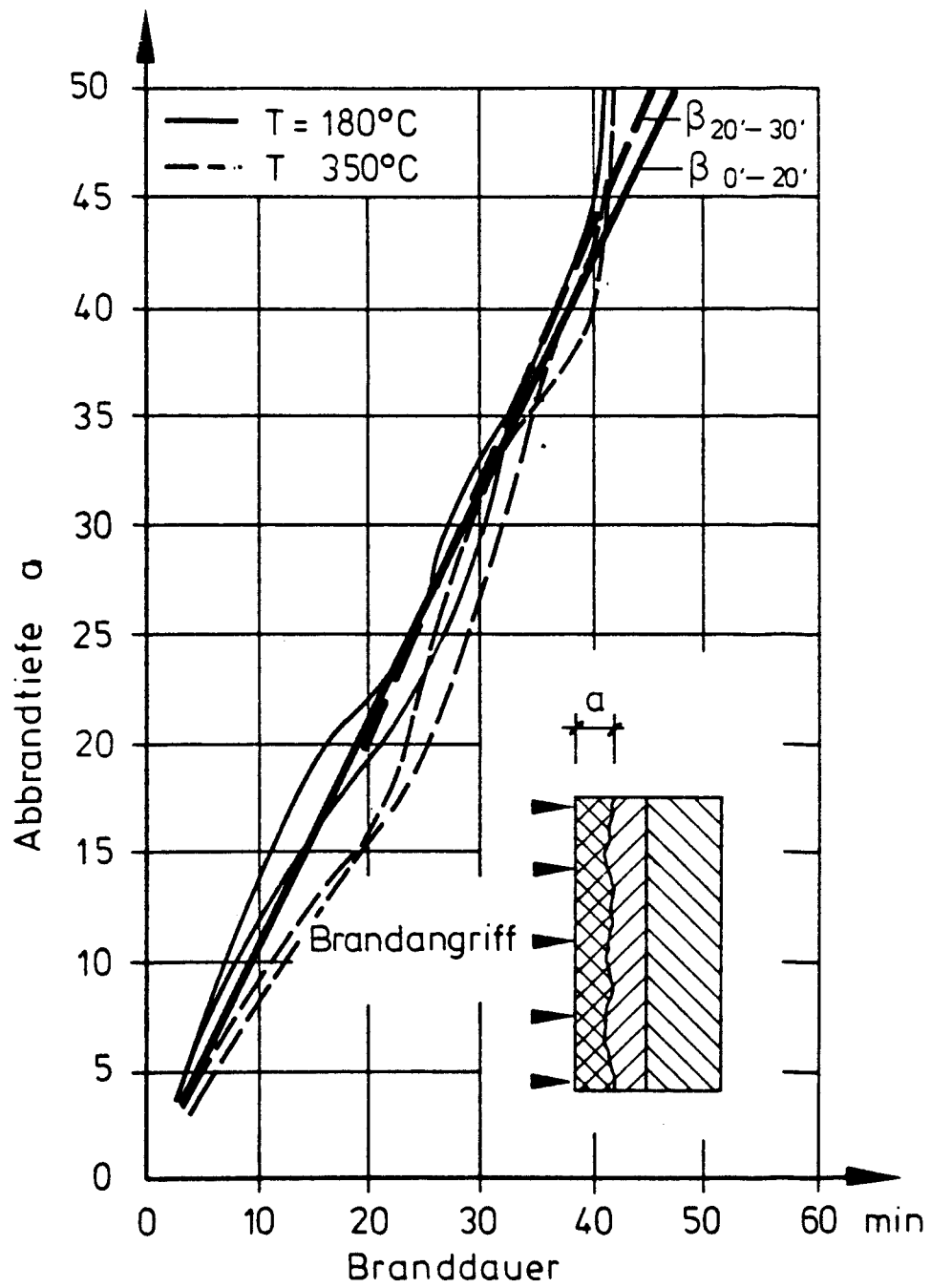


Anlage 5.8.7

Versuch - Nr. 13, Mst. 51-60

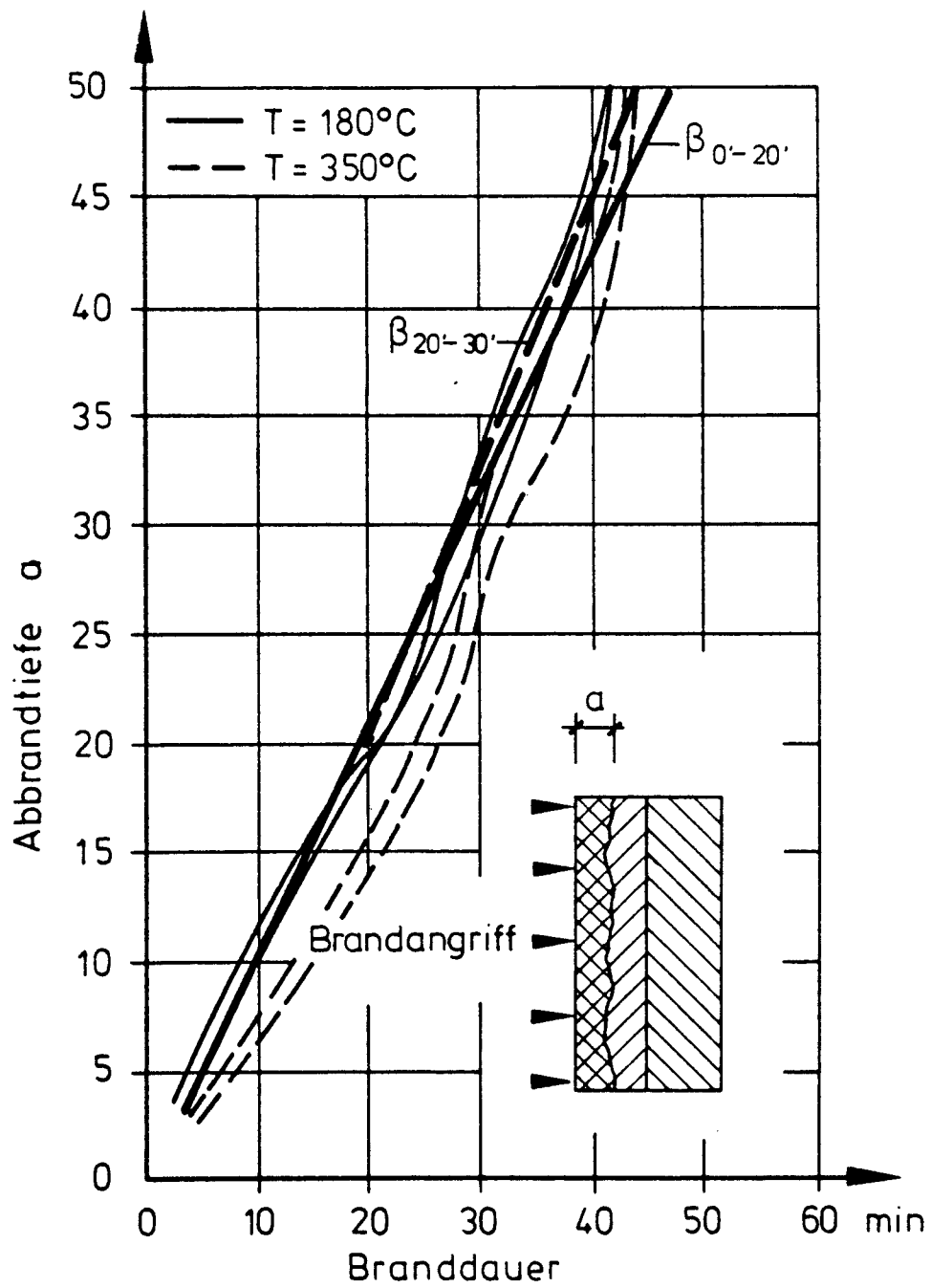
Temperatur in Grad Celsius





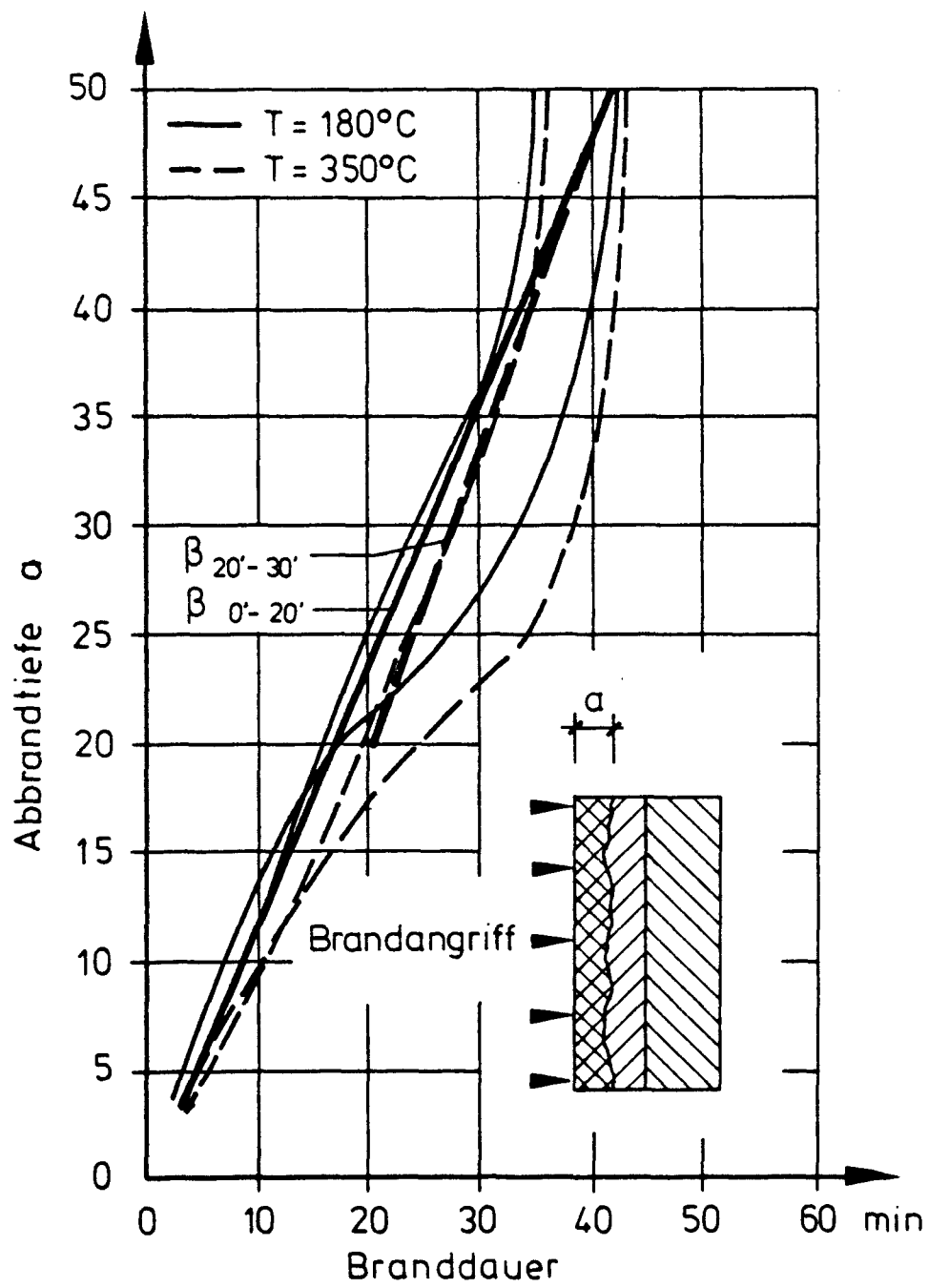
Anlage 6.1

Vers.-Nr. 6



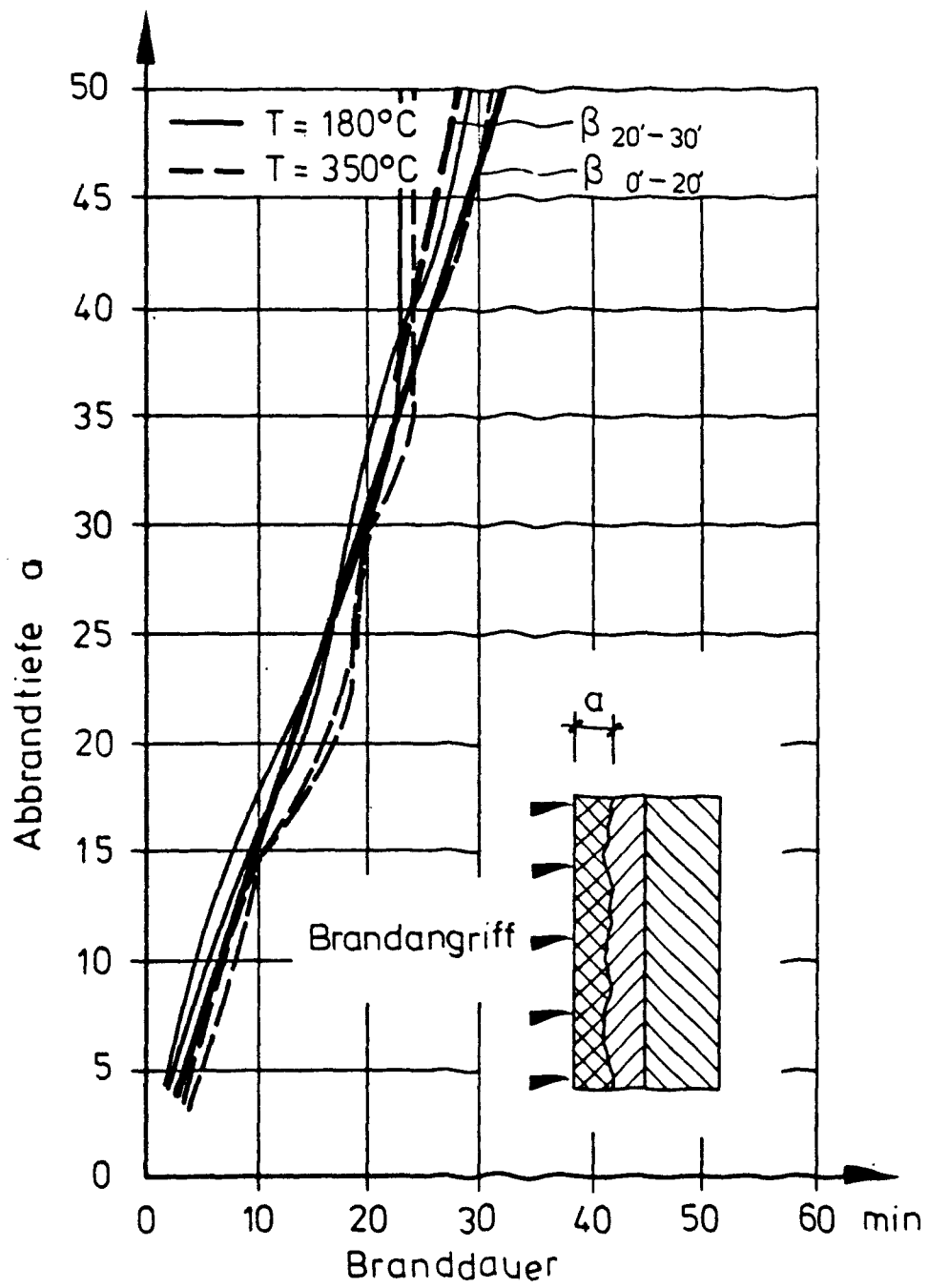
Anlage 6.2

Vers.-Nr. 7



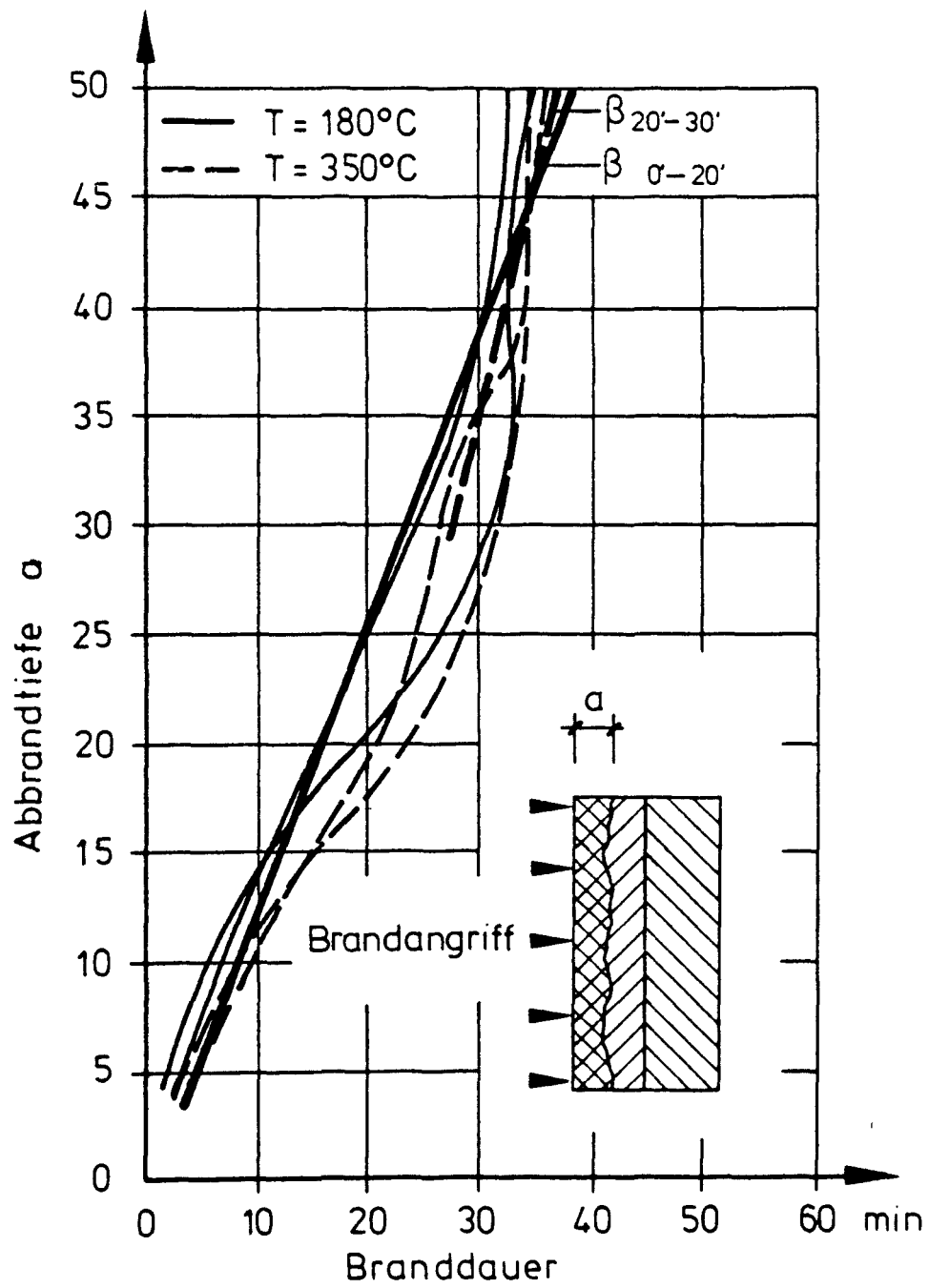
Anlage 6.3

Vers.-Nr. 8



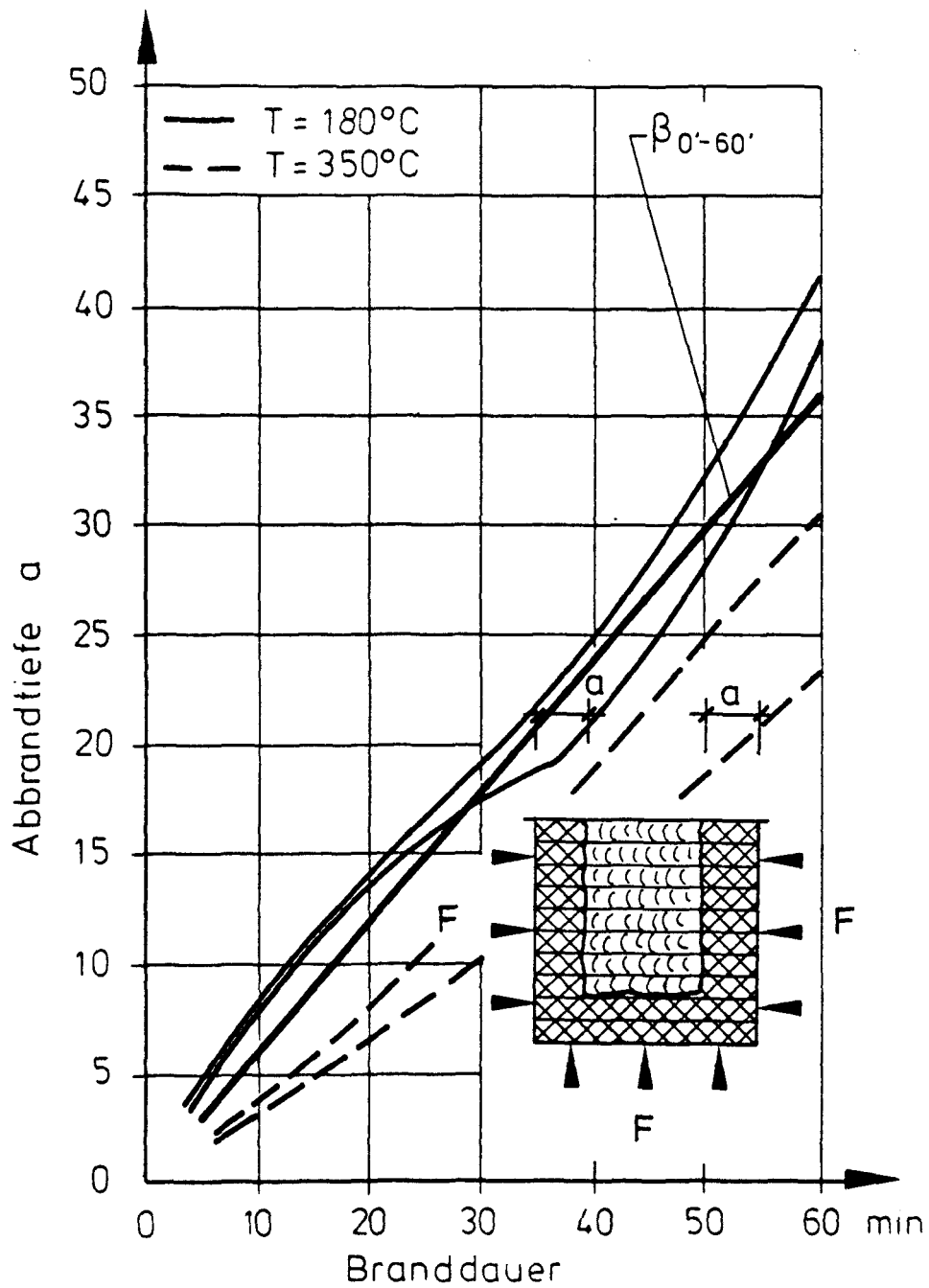
Anlage 6.4

Vers.-Nr. 9



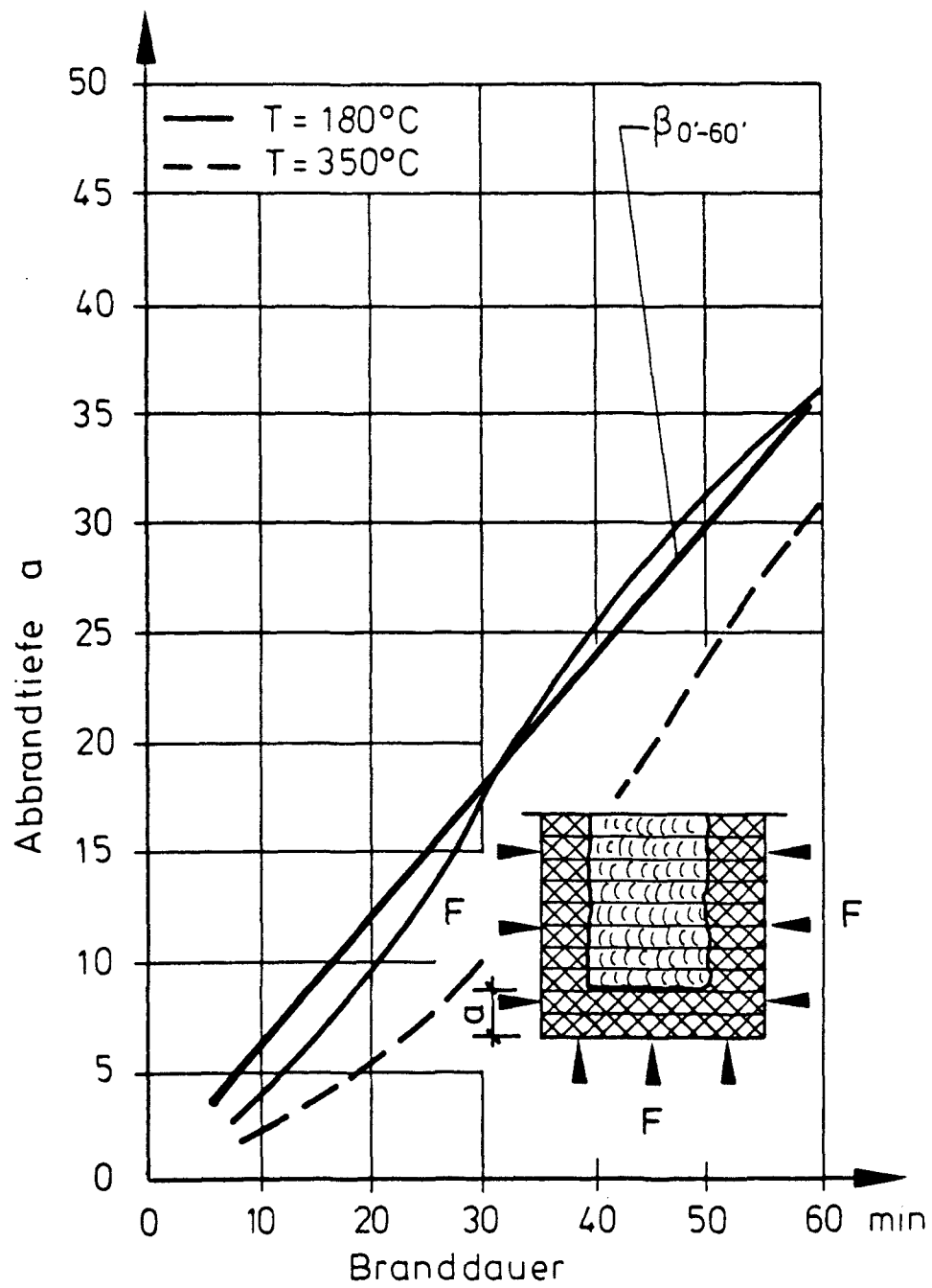
Anlage 6.5

Vers.-Nr. 10



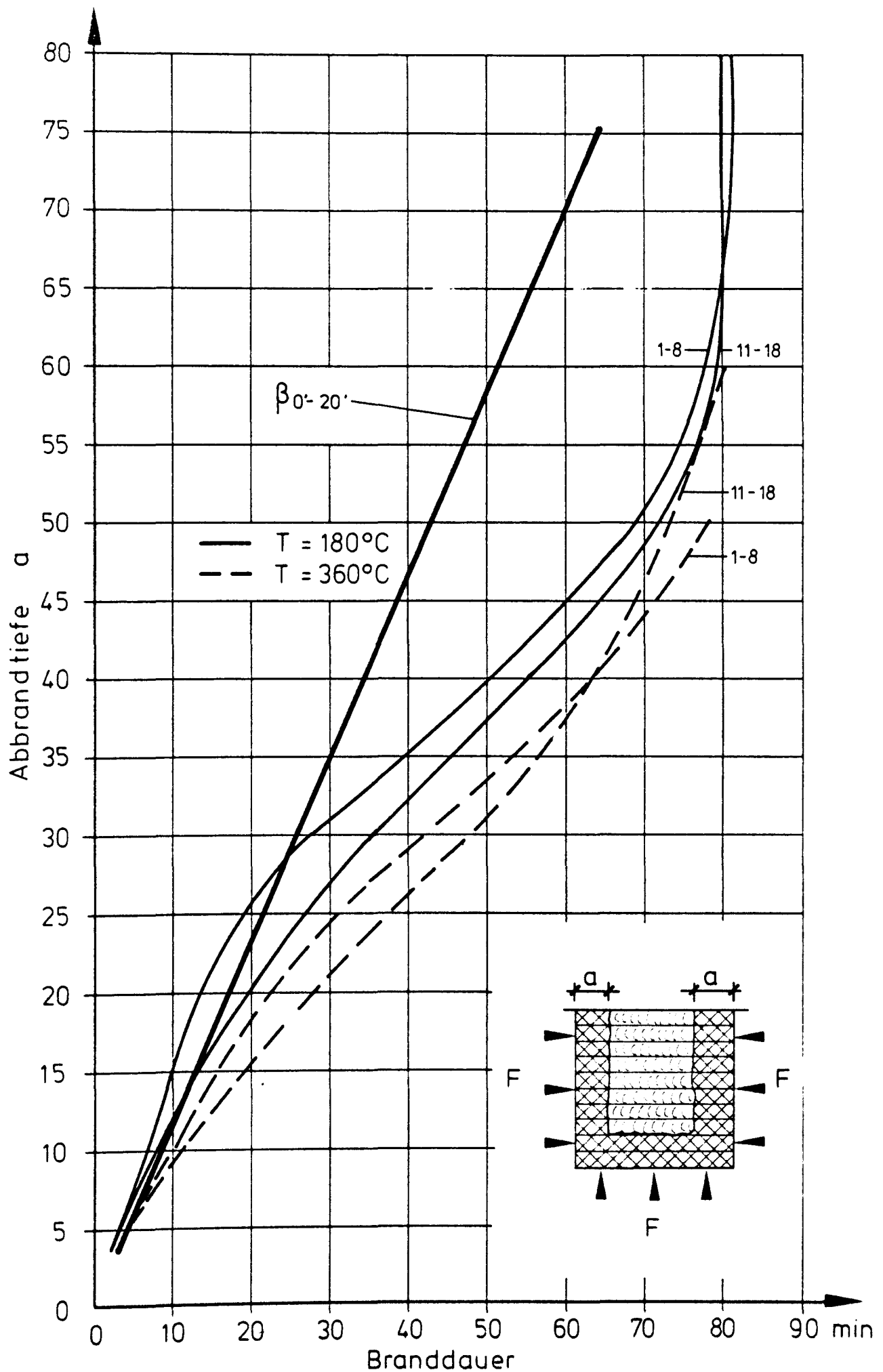
Anlage 6.6

Vers.-Nr. 11 seitlicher Abbrand Balken



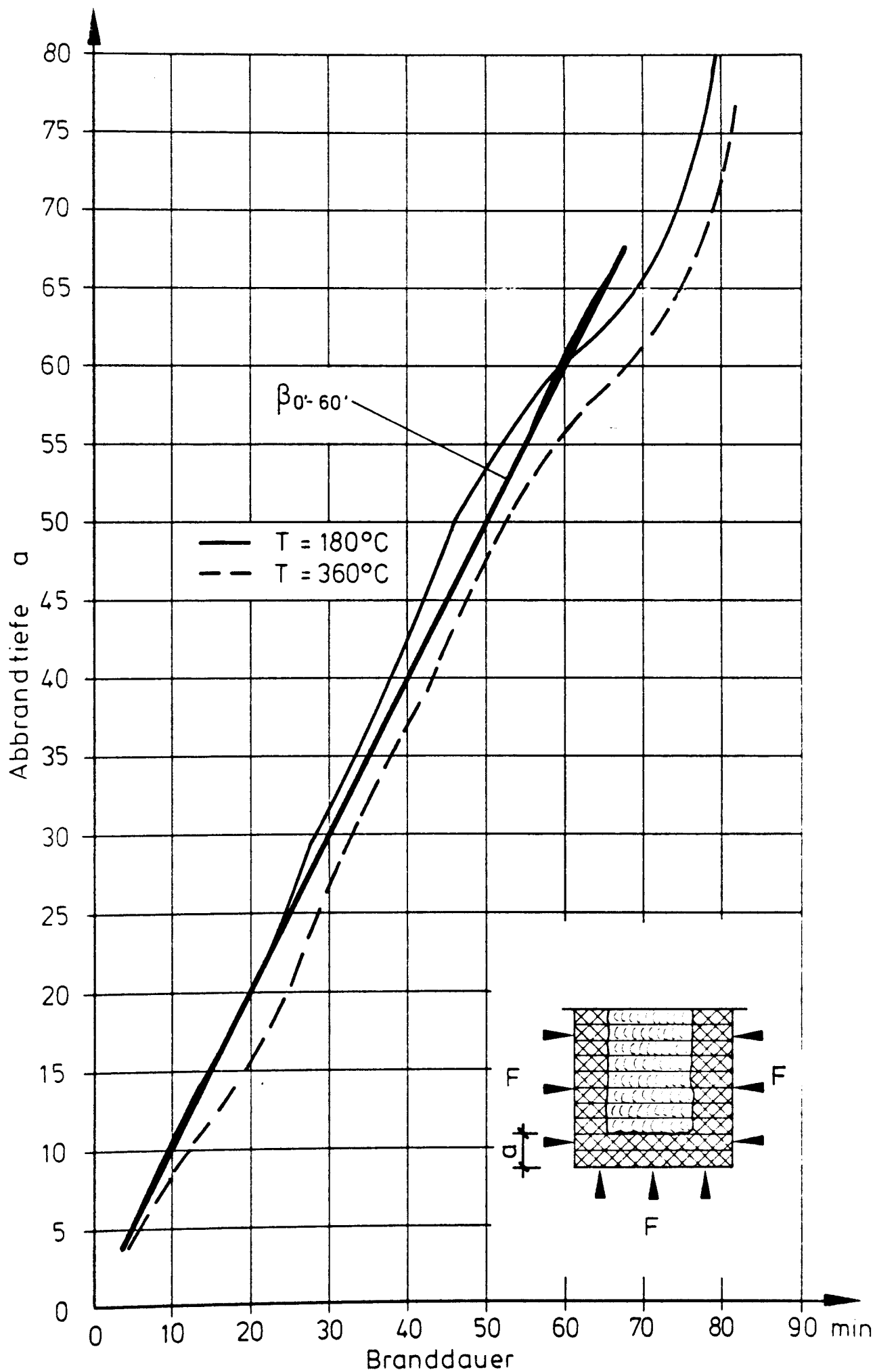
Anlage 6.7

Vers.-Nr. 11 unterer Abbrand Balken



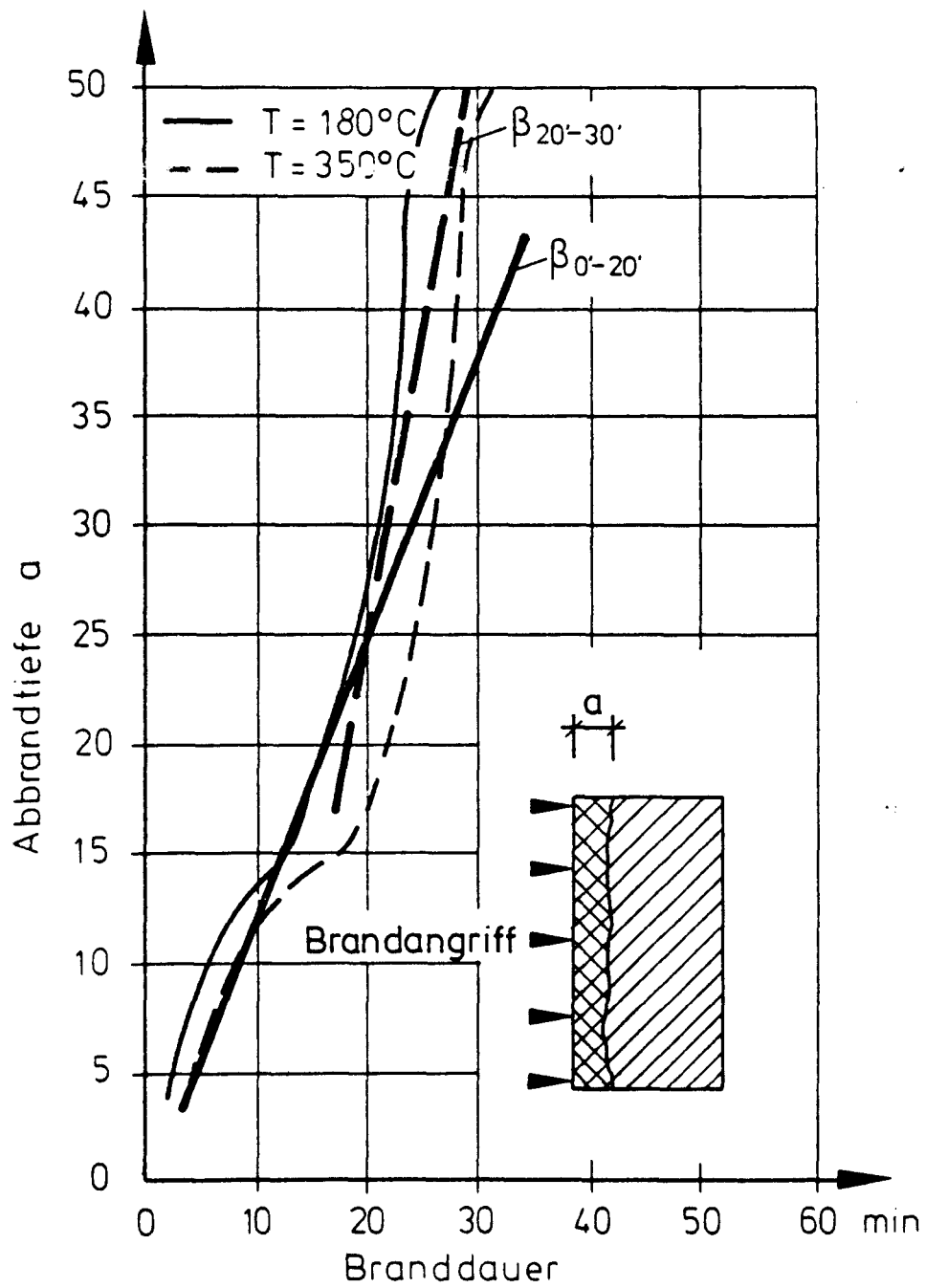
Anlage 6.8

Vers.-Nr. 12 seitlicher Abbrand Balken



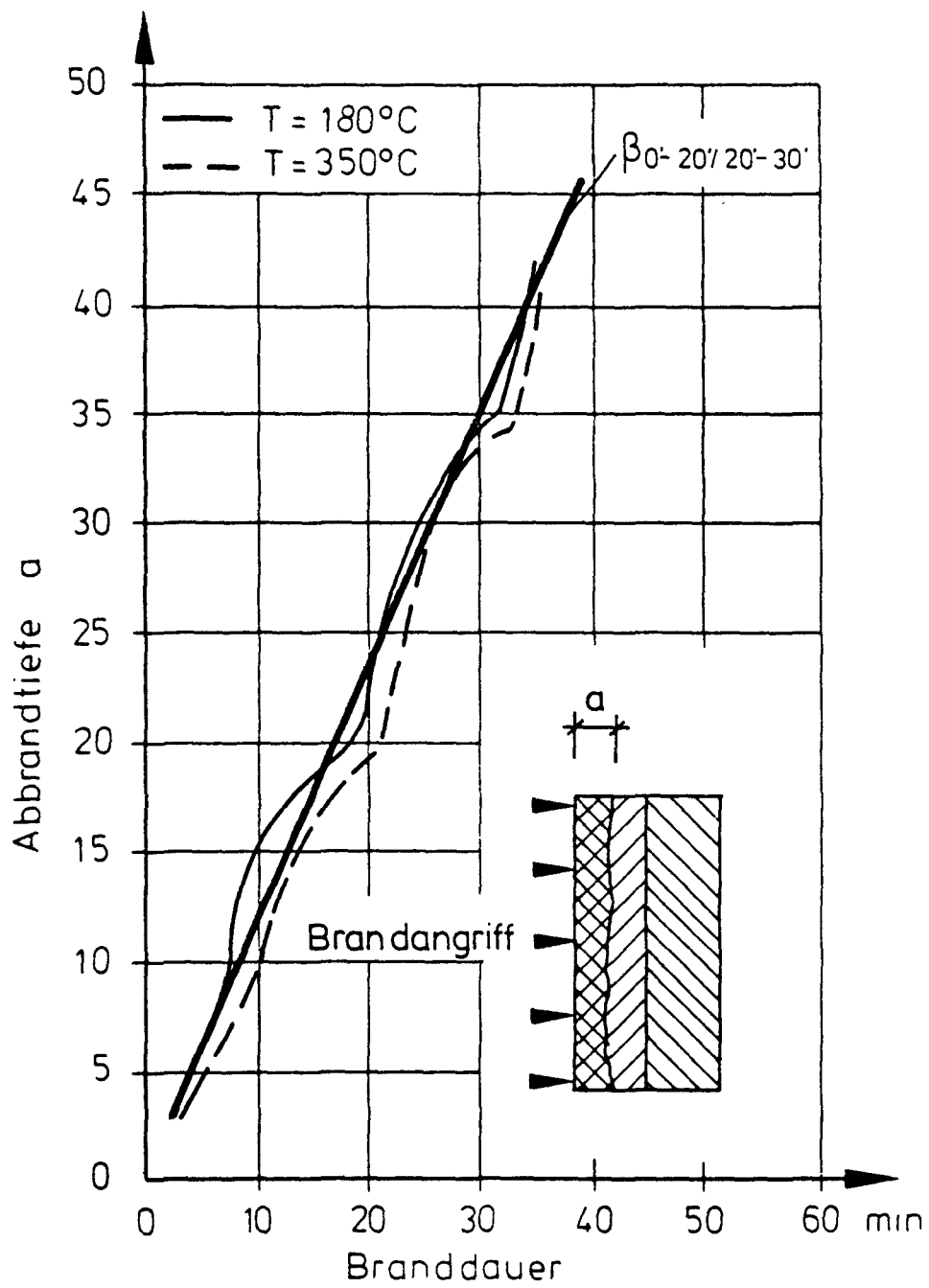
Anlage 6.9

Vers.-Nr. 12 unterer Abbrand Balken



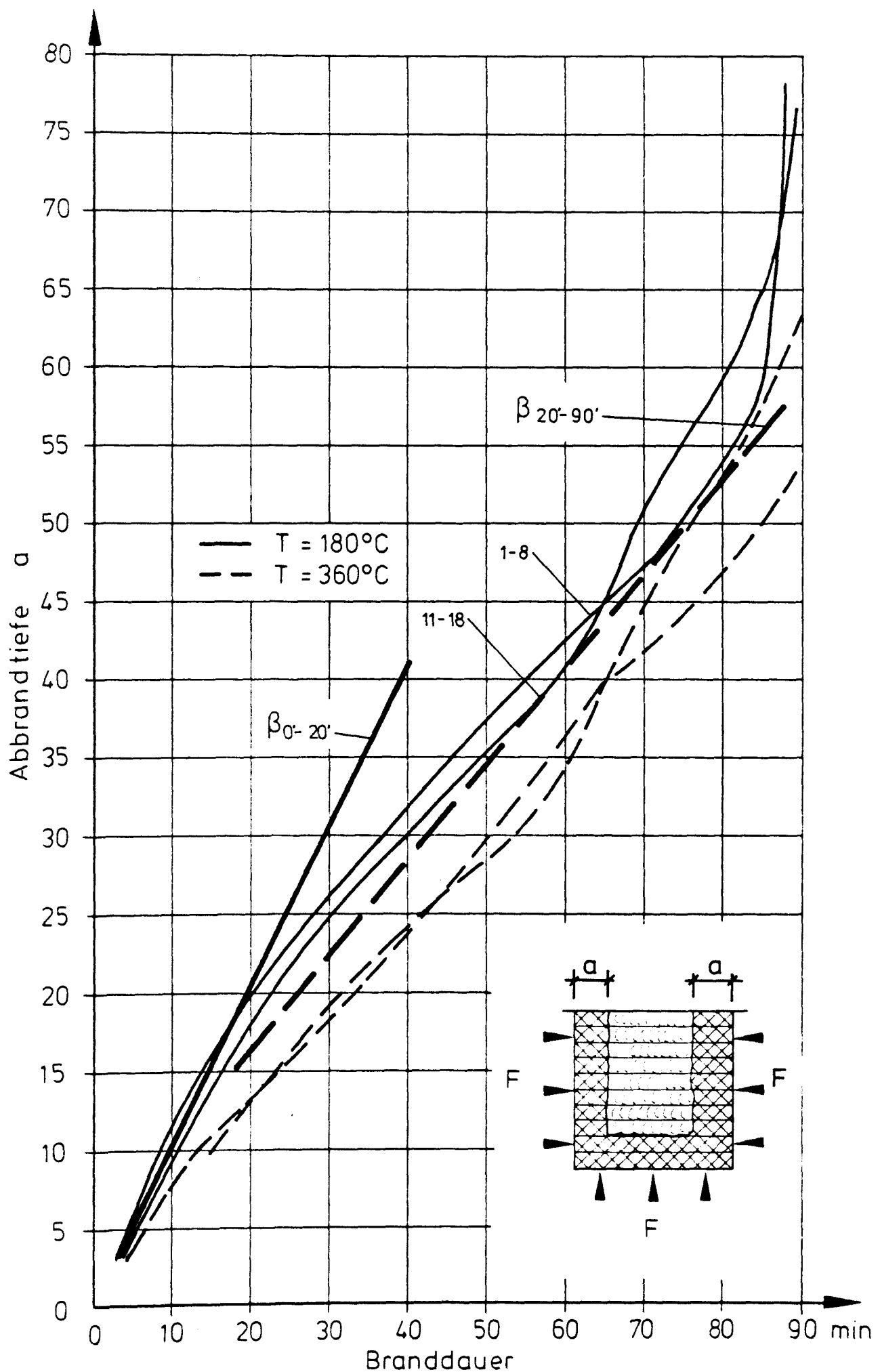
Anlage 6.10

Vers.-Nr. 12 Abbrand Holzbohlen



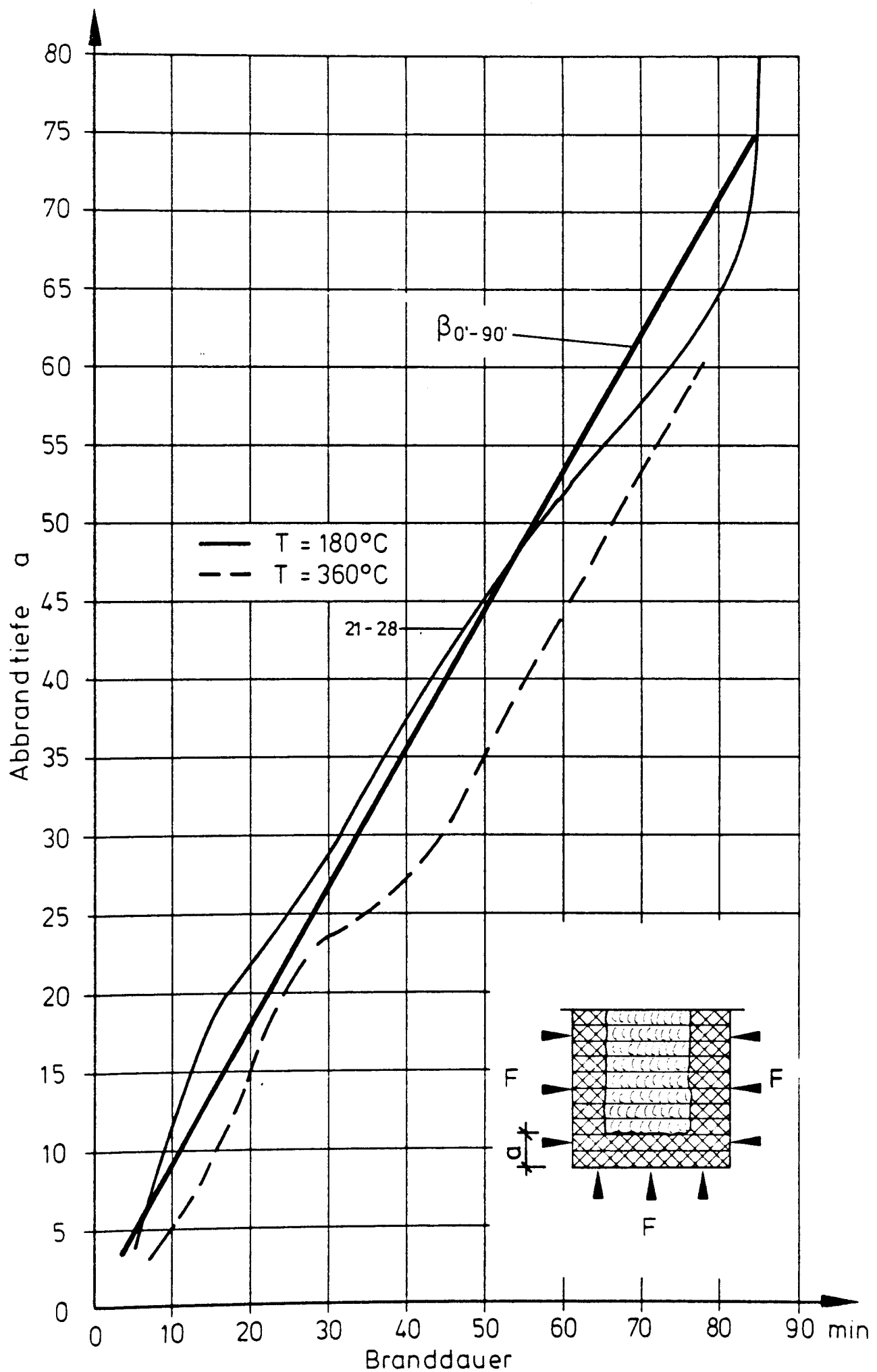
Anlage 6.11

Vers.-Nr. 12 Abbrand Spanplatten



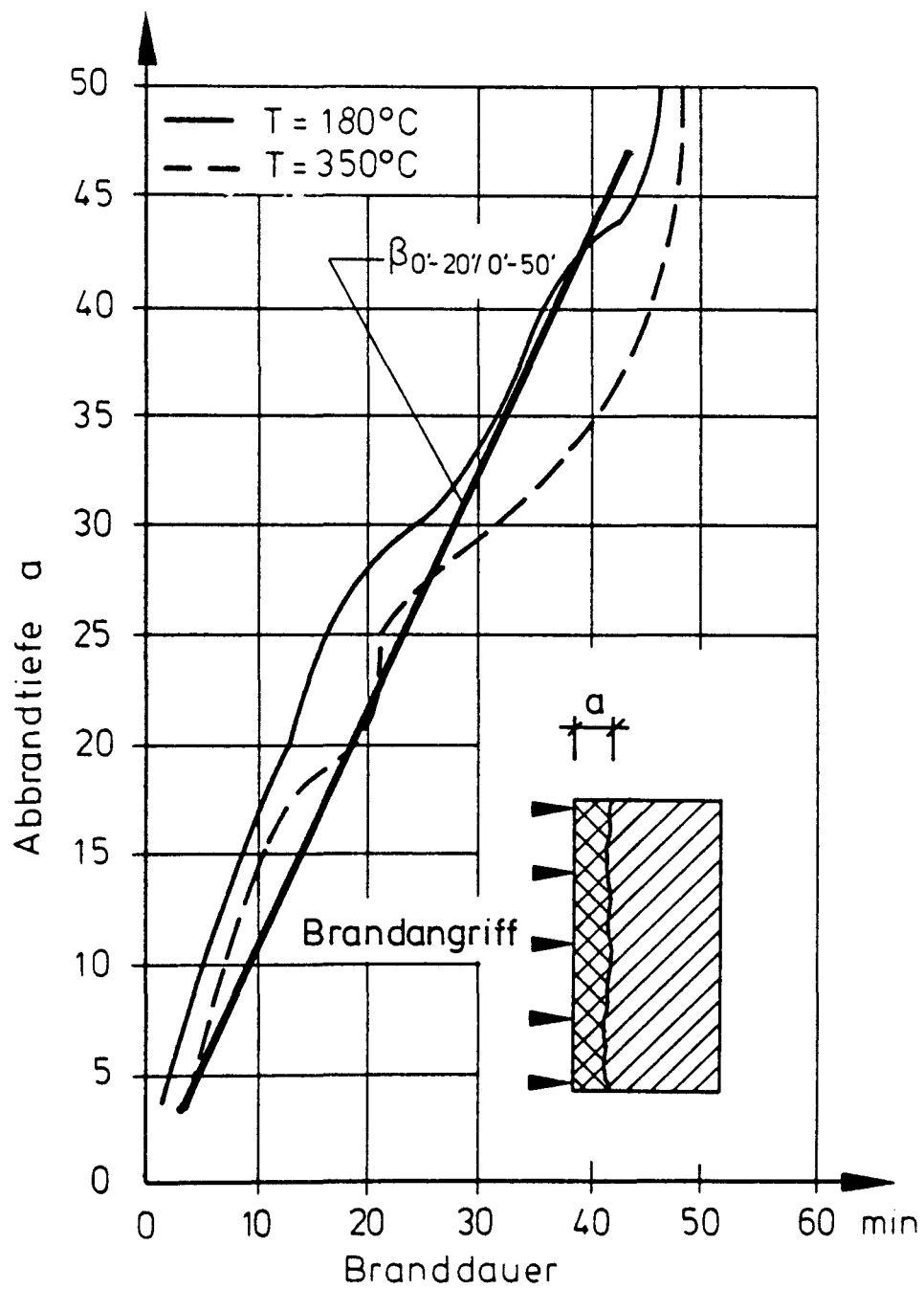
Anlage 6.12

Vers.-Nr. 13 seitlicher Abbrand Balken



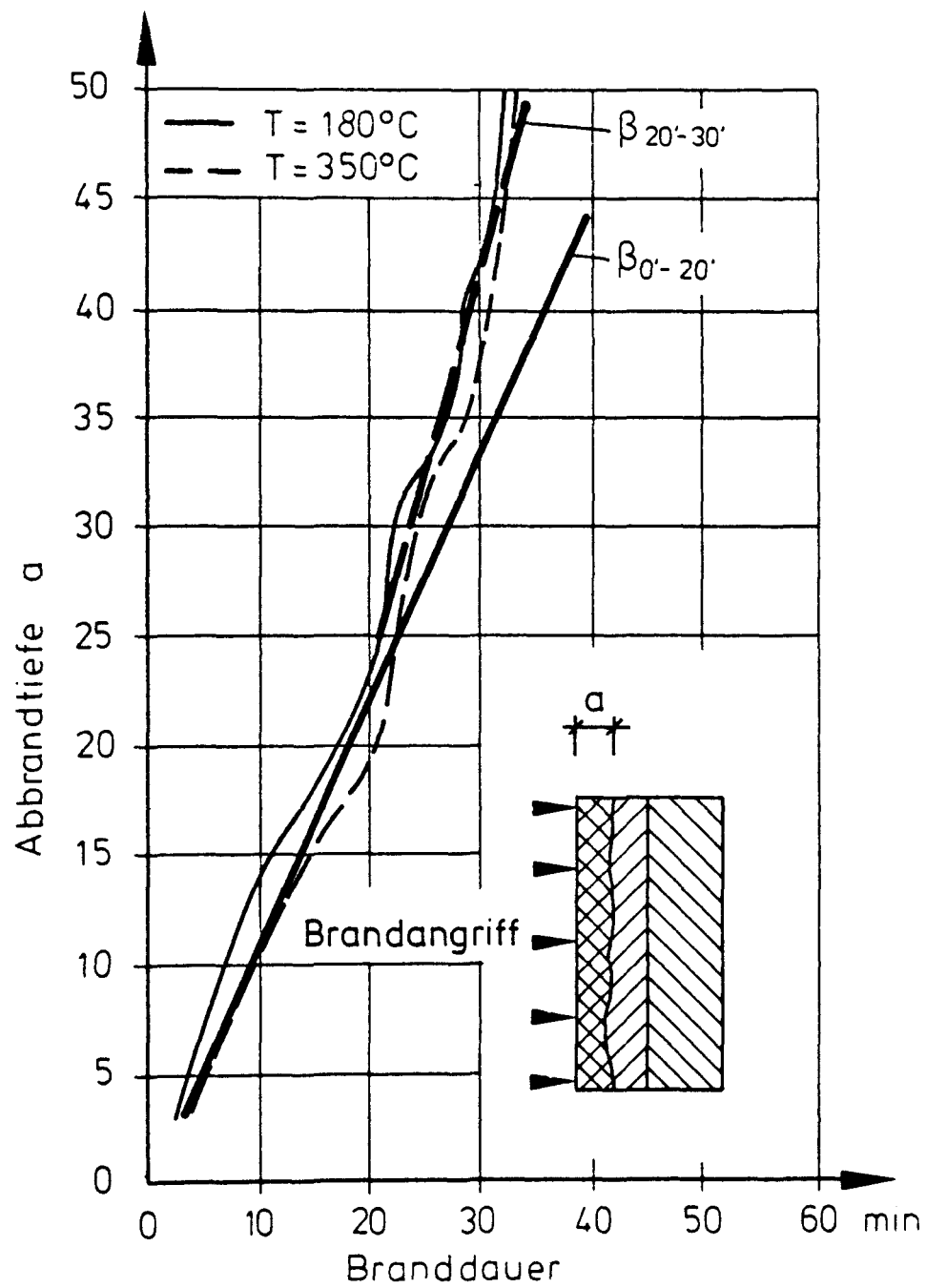
Anlage 6.13

Vers.-Nr. 13 unterer Abbrand Balken



Anlage 6.14

Vers.-Nr. 13 Abbrand Holzbohlen

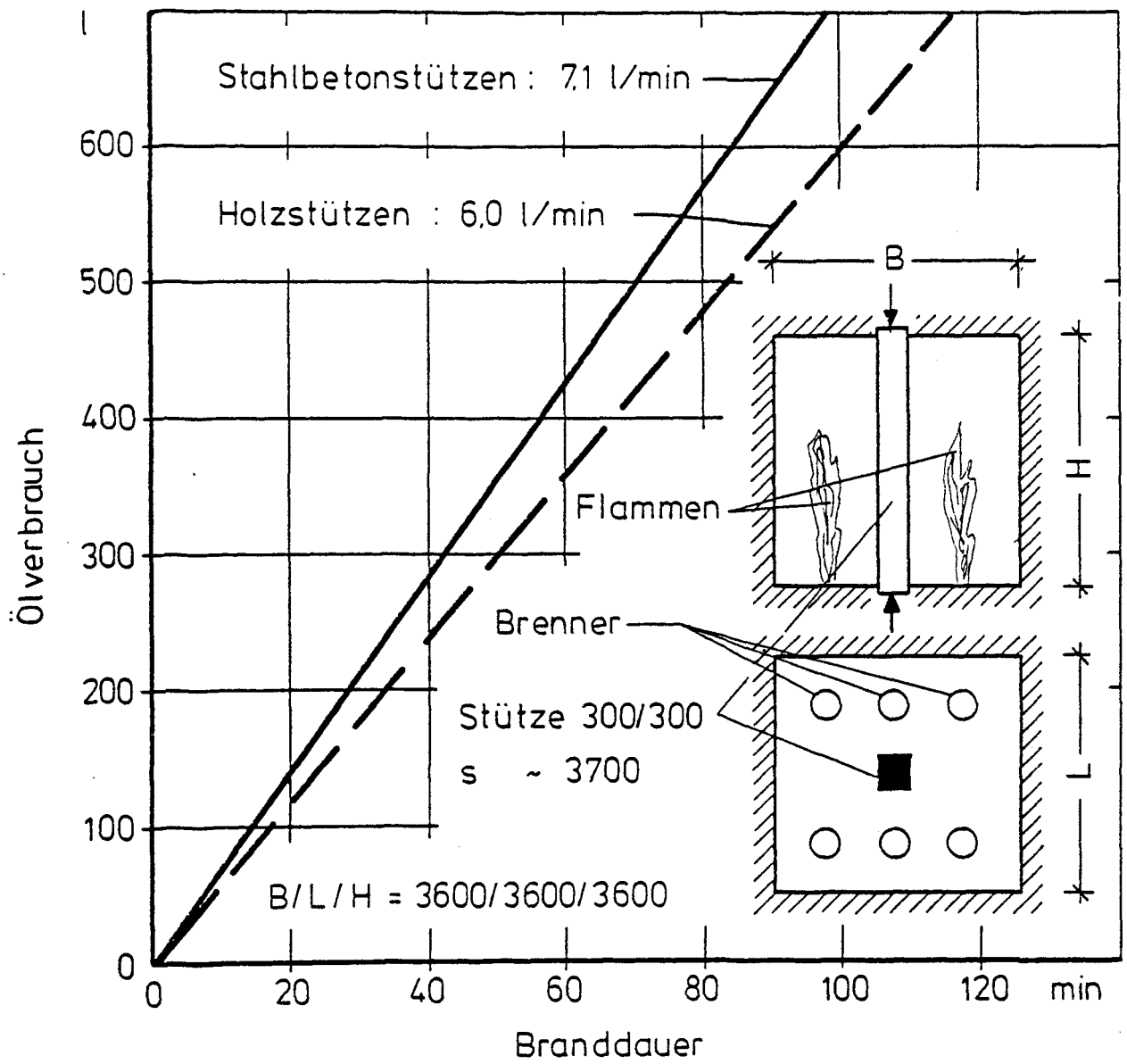


Anlage 6.15

Vers.-Nr. 13 Abbrand Spanplatten

Anlagenübersicht: Großversuche

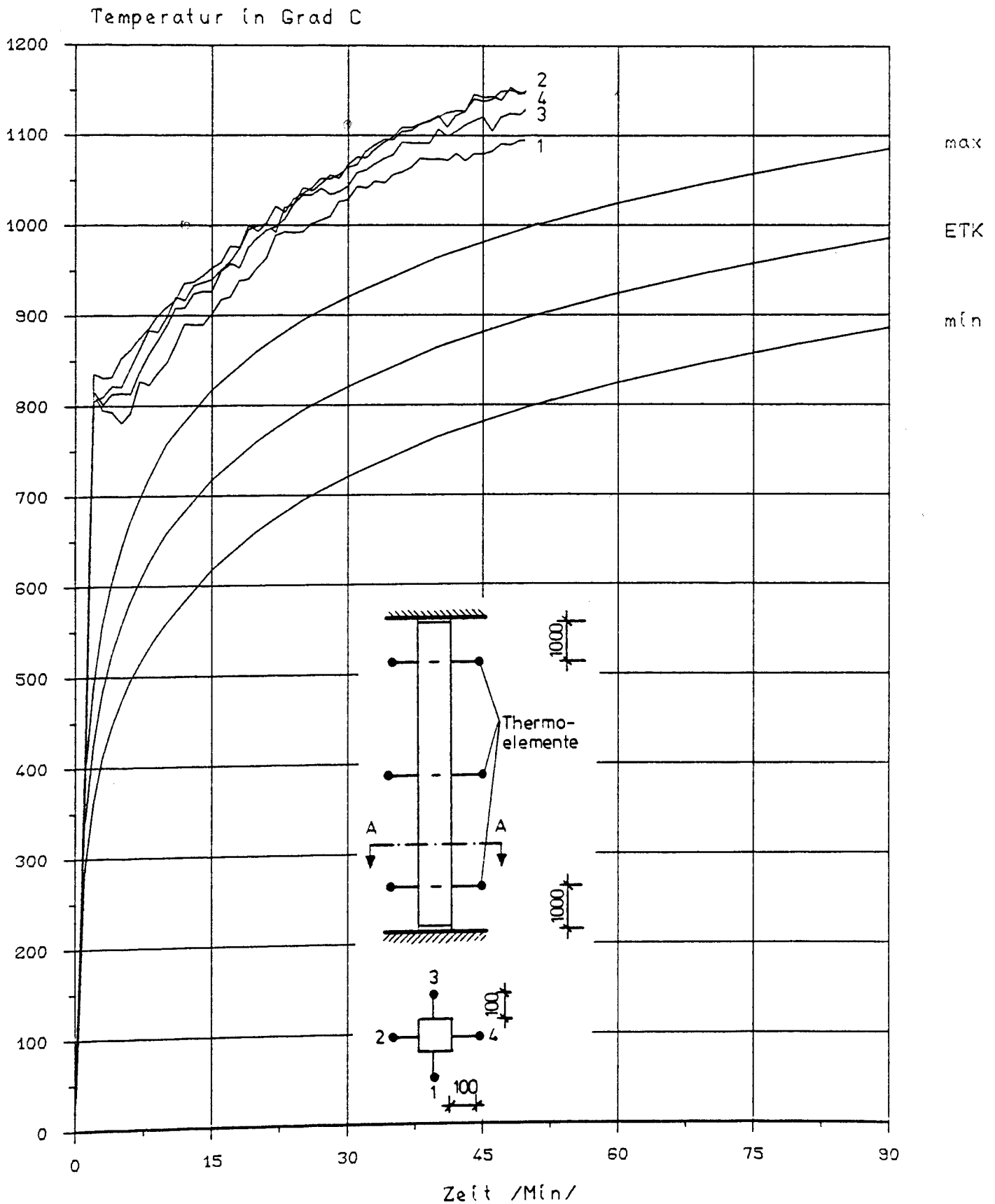
Anlage	Versuch	Brandlast, Erläuterung	Darstellung
7.1	14	$q_{\text{Stützenprüfstand}}$	Ölmengen-Verbrauch
7.2	14	q_{Beton} , Meßstellen 1 - 4	Brandraum-Temperaturen
7.3	14	q_{Beton} , Meßstellen 5 - 8	
7.4	14	q_{Beton} , Meßstellen 9 - 12	
7.5	14	q_{Beton} , Meßstellen 21 - 24	Stützen-Temperaturen
8.1	15	$q_{\text{Wandprüfstand}}$	Ölmengen-Verbrauch
8.2	15	q_{Beton}	Brandraum-Temperaturen



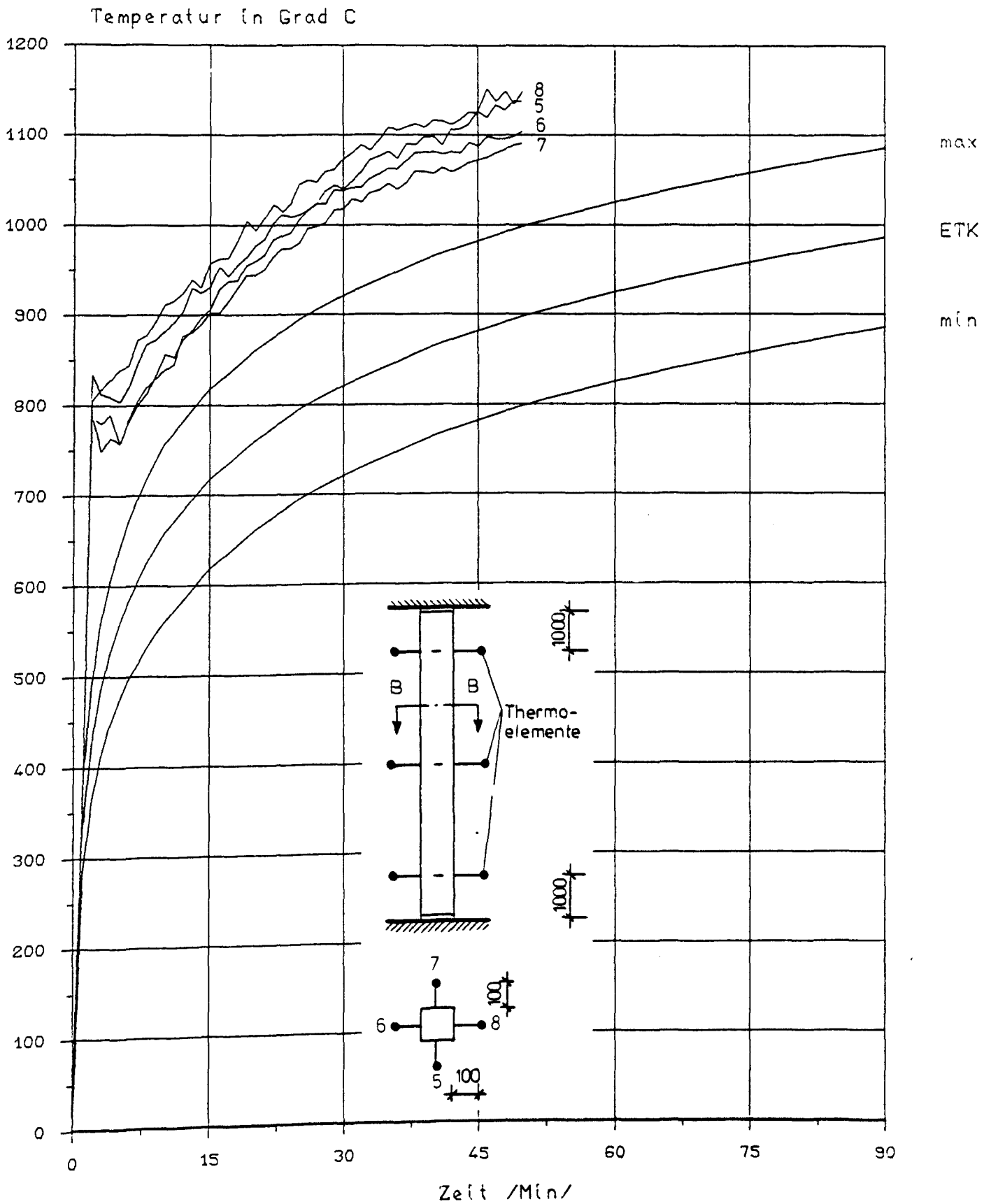
$$A_t = 77,76 \text{ m}^2$$

Anlage 7.1

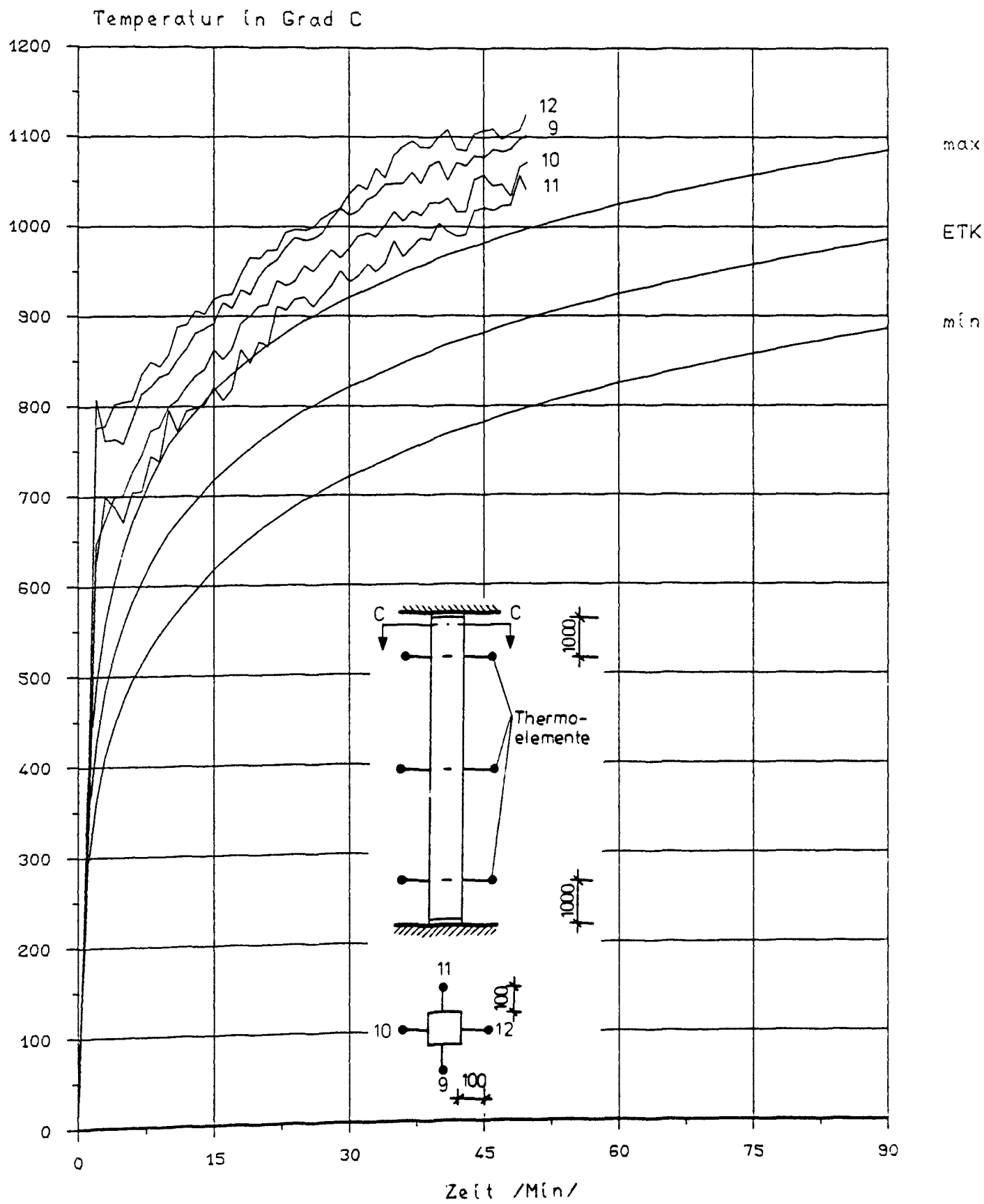
Anlage 7.2
Versuch 14
Mst. 1-4



Anlage 7.3
Versuch 14
Mst. 5-8



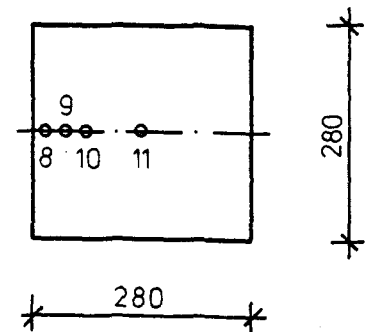
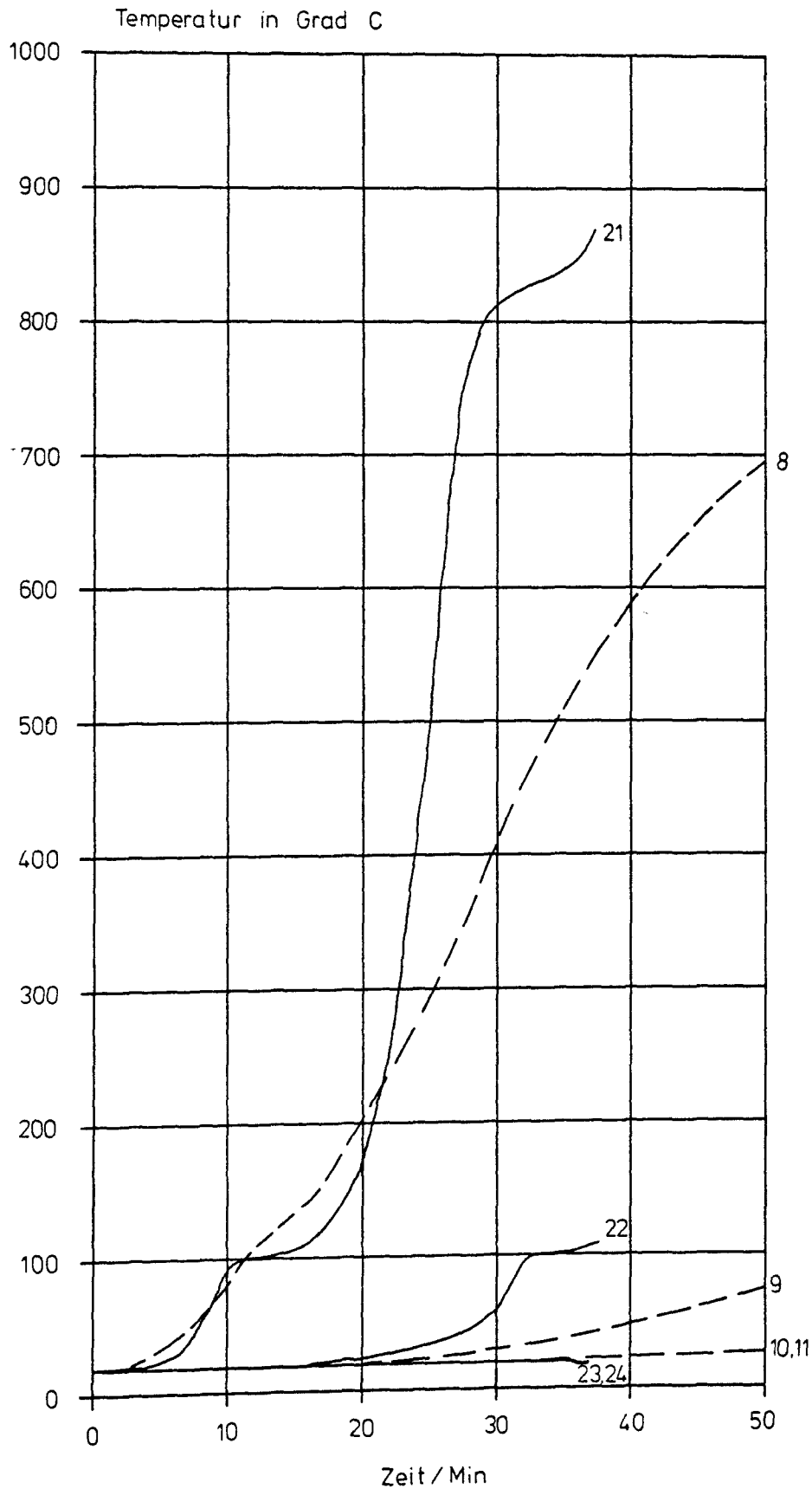
Anlage 7.4
Versuch 14
Mst. 9-12



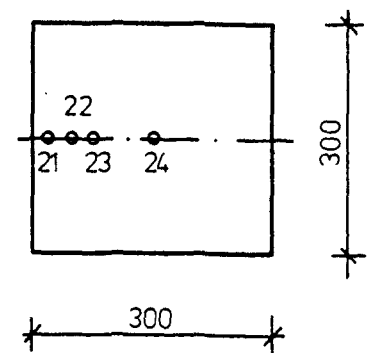
Anlage 7.5 Vergleichskörper

Versuch 14 Mst. 21-24 — T entsprechend Anlage 7.2-7.4

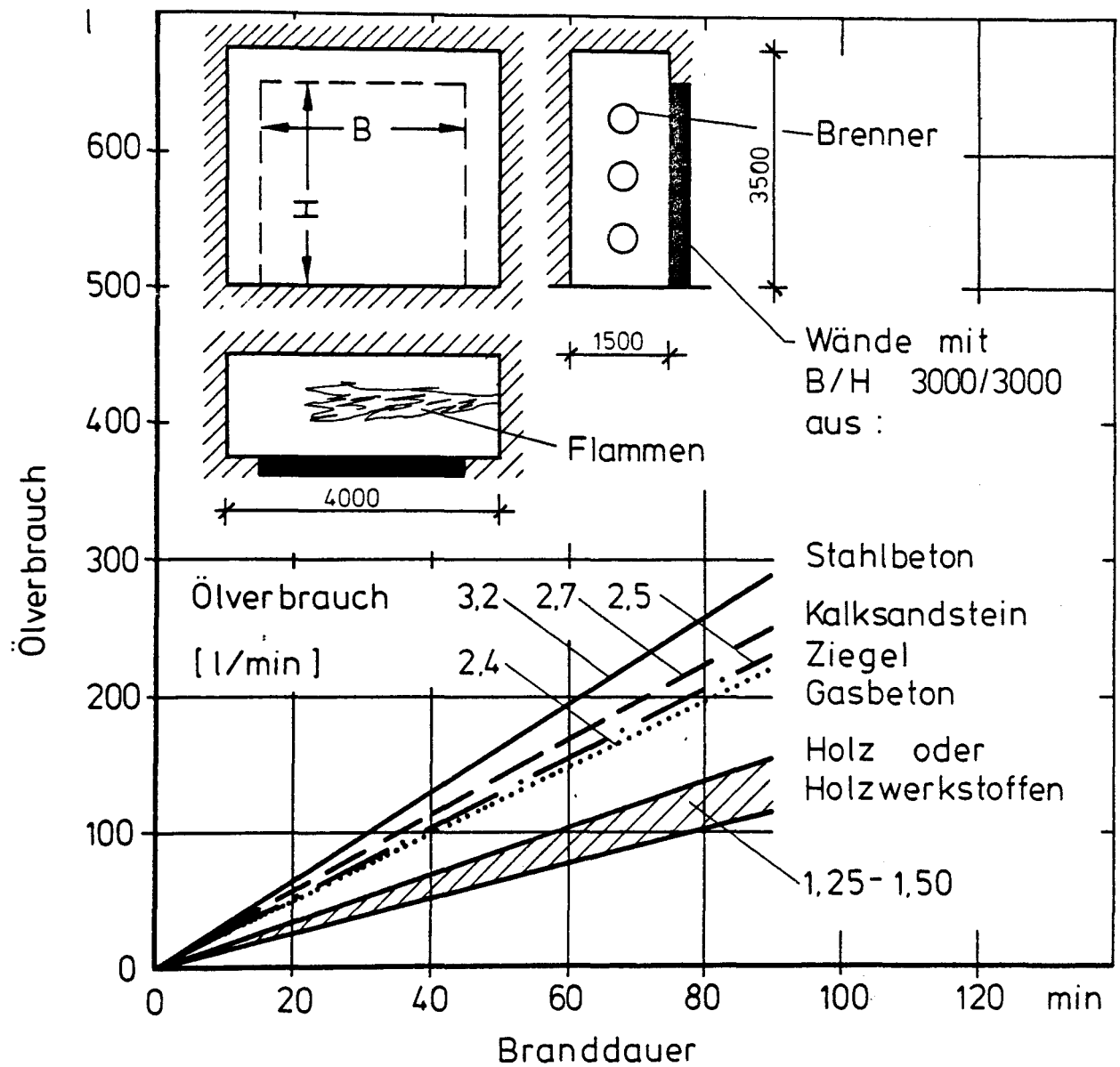
Zum Vergleich Mst. 8-11 --- T bei Beflammung nach ETK



8 : 15 mm vom Rand
9 : 40 " " "
10 : 70 " " "
11 : 140 " " "

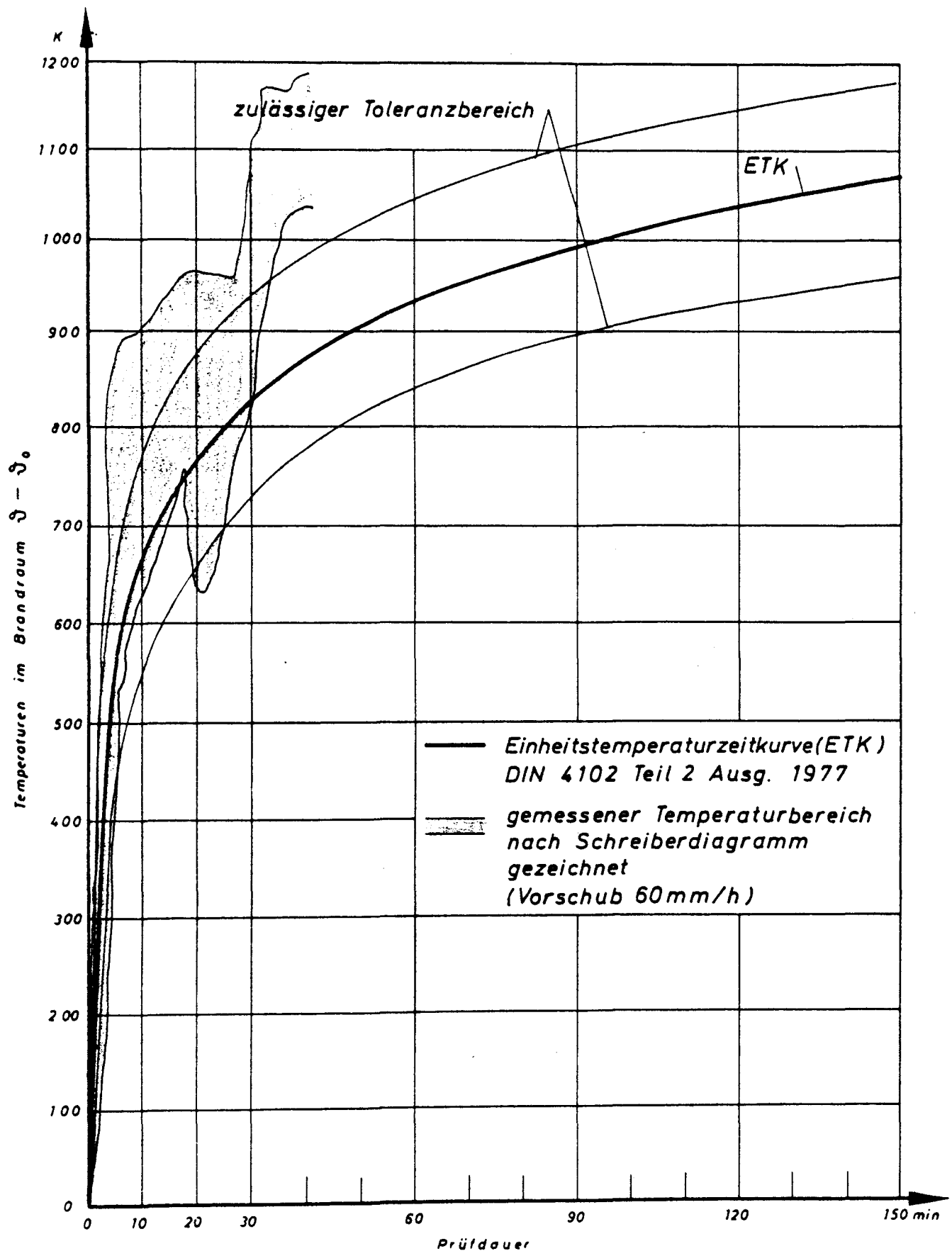


21 : 15 mm vom Rand
22 : 40 " " "
23 : 70 " " "
24 : 150 " " "



$$A_t = 50.7 \text{ m}^2$$

Anlage 8.1



Temperaturen im Brandraum Prüfung 15

Anlage 8.2

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen